

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA
MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD DE RAYOS Y SU RELACIÓN CON
LAS VARIABLES CLIMÁTICAS DE PRESIÓN Y PRECIPITACIÓN
EN ESPAÑA***

Madrid, (Julio, 2014)

***Alumn(a/o): Jacinto José Fernández
Carmona***

***Tutor: Antonio Vázquez
(Cotutor): Pilar Moreno***

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA
MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD DE RAYOS Y SU RELACIÓN CON
LAS VARIABLES CLIMÁTICAS DE PRESIÓN Y PRECIPITACIÓN
EN ESPAÑA***



Madrid, (Julio, 2014)

***Alumn(a/o): Jacinto José Fernández
Carmona***

***Tutor: Antonio Vázquez
(Cotutor): Pilar Moreno***

A mi familia y amigos, que me han hecho llegar hasta aquí.

A Sarah, parte fundamental de este proyecto.

ÍNDICE

	Pág.
1. Antecedentes y objetivos.....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivos generales.....	6
1.2.2 Objetivos particulares.....	6
2. Tratamiento de los datos.....	6
2.1 Selección de datos del trabajo.....	11
2.2 Generación de gráficas.....	14
2.2.1 Obtención de archivos previos.....	18
2.2.2 Producción de gráficas.....	18
2.2.2.1 Corrección de las gráficas.....	27
2.2.2.2 Clasificación.....	29
3. Obtención de zonas de interpolación.....	32
3.1. Sector costero: Llano.....	33
3.2 Sector costero montañoso: Barlovento.....	34
3.3 Sector costero montañoso: Sotavento.....	35
3.4 Sector interior llano: Regadío.....	36
3.5 Sector interior llano: Secano.....	37
3.6 Sector interior montañoso con estaciones a sotavento.....	37
3.7 Sector interior montañoso con estaciones a barlovento.....	38
3.8 Sector interior montañoso con estaciones a dos vertientes.....	39
4. Aplicación de la interpolación.....	40
4.1 Estado del arte.....	40
4.2 Trabajos previos.....	41
4.2.1 Obtención de fechas de interpolación.....	41
4.2.2 Obtención de archivos de interpolación.....	42
4.2.3 Obtención del Modelo Digital de Elevaciones.....	43
4.3 Selección de archivos de interpolación.....	46
4.3.1 Selección de métodos de interpolación.....	46
4.3.1.1 Inverso de la distancia (IDW).....	46
4.3.1.2 Co-kriging ordinario.....	47
4.3.1.3 Spline thin plate.....	48
4.3.1.4 Regresión múltiple.....	48
4.3.2 Cálculo del número de registros por fecha.....	48
4.4 Características de la interpolación.....	52
5. Conclusiones y trabajos futuros.....	55
5.1 Conclusiones de las gráficas.....	55
5.2 Conclusiones de las interpolaciones.....	57



5.3 Trabajos futuros.....	58
6. Presupuesto.....	59
7. Referencias.....	62
ANEXO A. Gráficas	
ANEXO B. Resultados de la interpolación	
ANEXO C. Mapas de interpolación	

1. Antecedentes y objetivos

1.1 Antecedentes

En el mes de noviembre de 2013 estuve viendo propuestas para realizar el Proyecto Fin de Máster y decidí junto con mi compañera Sarah Cernuda ir a visitar a Pilar Moreno, profesora en la asignatura de Aplicaciones SIG del Máster.

La razón era que estaba interesado en realizar el trabajo sobre archivos ráster dentro del ámbito de Sistemas de Información Geográfica, ya que en el anterior Trabajo Fin de Carrera en la titulación de Ingeniero Técnico en Topografía por la Universidad de Extremadura realizado en el año 2012 en Mérida (Badajoz) trabajé también con Sistemas de Información Geográfica pero con archivos de tipo vectorial, y no quería repetir similares procesos que había realizado antes. Además al haber estudiado el itinerario B del máster, quería aumentar y perfeccionar mis conocimientos en esta disciplina.

Desde el primer momento nos presentó este proyecto de investigación que quería emprender junto con Antonio Vázquez y que partía de los datos de actividad de rayos obtenidos por Miguel Ángel Manso y tanto mi compañera Sarah Cernuda como yo estuvimos interesados en este proyecto.

De principio decidimos trabajar juntos ya que la cantidad de trabajo era suficiente para presentar un Trabajo Fin de Máster de dos personas y creíamos que la normativa lo permitía.

Además, a través de una reunión con el director del Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Miguel Ángel Manso, pudimos acceder a una beca para cubrir los créditos del Trabajo Fin de Máster y se nos asignó un puesto de trabajo dentro del Centro Geo I+D. Así nos convertimos en becarios de este centro, con sueldo y cotización.

En mayo de este año, nos comunicaron de que los Trabajos Fin de Máster debían ser individuales y no podíamos presentarlo juntos, por lo que decidimos repartirnos el trabajo a fin de cumplir con la Normativa de la Universidad Politécnica de Madrid.

Este proyecto investiga la posible relación existente entre la actividad de rayos en España desde octubre de 2011 a noviembre de 2012 con las variables climáticas de presión atmosférica y precipitación en España. Para ello partimos de datos de actividad de rayos con observaciones realizadas cada 10 minutos antes y después del impacto del rayo junto a sus correspondientes datos meteorológicos.

Así, este proyecto tiene un complementario realizado por Sarah Cernuda titulado: “Estudio de la actividad de rayos y su relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación en España”.



A través de la obtención de gráficas, el estudio de ellas y el uso de interpolaciones dentro de software SIG, se obtienen unas conclusiones acerca de los métodos adecuados para interpolar en distintos tipos de terreno dentro de España.

1.2 Objetivos

Los objetivos que han motivado la realización de este proyecto son:

1.2.1 Objetivos generales

Con el fin de caracterizar mejor geográfica, temporal y meteorológicamente el comportamiento y la incidencia del rayo como fenómeno, es necesario analizar la relación de causalidad entre éste y las condiciones del contexto geográfico en el que se produce la descarga eléctrica, siendo especialmente relevantes las variables meteorológicas del entorno, en concreto presión y precipitación. Para contribuir a realizar dicho análisis, este trabajo tiene por objetivo estimar y estudiar las condiciones meteorológicas presentes en las localizaciones donde se han registrado los rayos, lo que permitirá conocer mejor el proceso físico de la atmósfera que desencadenó el fenómeno.

En aquellas zonas donde no se disponga de datos sobre las condiciones meteorológicas, se realizará el mismo estudio citado anteriormente, teniendo ahora como objetivo específico, el estudio y aplicación de los métodos y técnicas de interpolación más adecuadas para las variables estudiadas.

1.2.2 Objetivos particulares

- Estudiar los trabajos previos correspondiente a este tema y obtener conclusiones tales como métodos empleados, precisiones...
- Obtener información gráfica de calidad que recoja las observaciones y datos de partida y sacar conclusiones de ella.
- Estudiar métodos de interpolación de variables climáticas y sus parámetros.
- Mejorar mi manejo de bases de datos y la realización de consultas a través del lenguaje SQL.
- Mejorar mi manejo en MATLAB y en software GIS (ArcGIS y QGIS).

2. Tratamiento de los datos

En esta primera fase del trabajo se realiza el tratamiento de los datos de partida en bruto y se obtienen una serie de archivos válidos para la investigación que son representados en una serie de gráficas.

Los datos de partida de este proyecto (preparados por Miguel Ángel Manso) se deben instalar en una base de datos PostgreSQL para tener acceso desde el ordenador de trabajo en el centro Geo I+D.

PostgreSQL es un sistema de gestión de bases de datos objeto-relacional, distribuido bajo licencia BSD y con su código fuente disponible libremente. Es el sistema de gestión de bases de datos de código abierto más potente del mercado y en sus últimas versiones no tiene nada que envidiarle a otras bases de datos comerciales.

PostgreSQL utiliza un modelo cliente/servidor y usa multiprocesos en vez de multihilos para garantizar la estabilidad del sistema. Un fallo en uno de los procesos no afectará el resto y el sistema continuará funcionando.

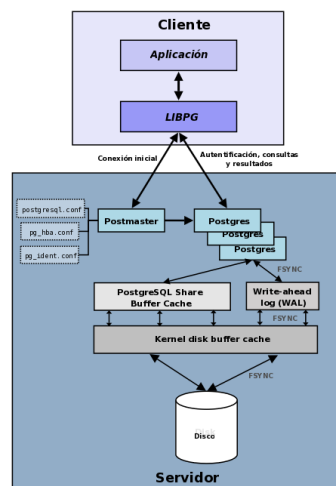


Fig.1 . Esquema de los componentes más importantes en un sistema PostgreSQL. Fuente: http://www.postgresql.org.es/sobre_postgresql

La base de datos de PostgreSQL del proyecto tiene las siguientes características:

- Dominio: localhost
- Puerto: 5432
- User: postgres
- Nombre: rayos
- Contraseña: Se debía quedar en blanco.

El programa que se va a usar para manejar la base de datos es pgAdmin III. Es el programa de administración de PostgreSQL más conocido del mercado. Es libre, está en multitud de idiomas y funciona bajo licencia de PostgreSQL. Está diseñado para responder a todas las necesidades de los usuarios: desde escribir consultas en SQL (Structured Query Language) a manejar complejas bases de datos.

La aplicación incluye un editor de consultas SQL y un editor de código del lado del servidor. La conexión puede realizarse por medio del protocolo TCP/IP o por Unix Domain Sockets.

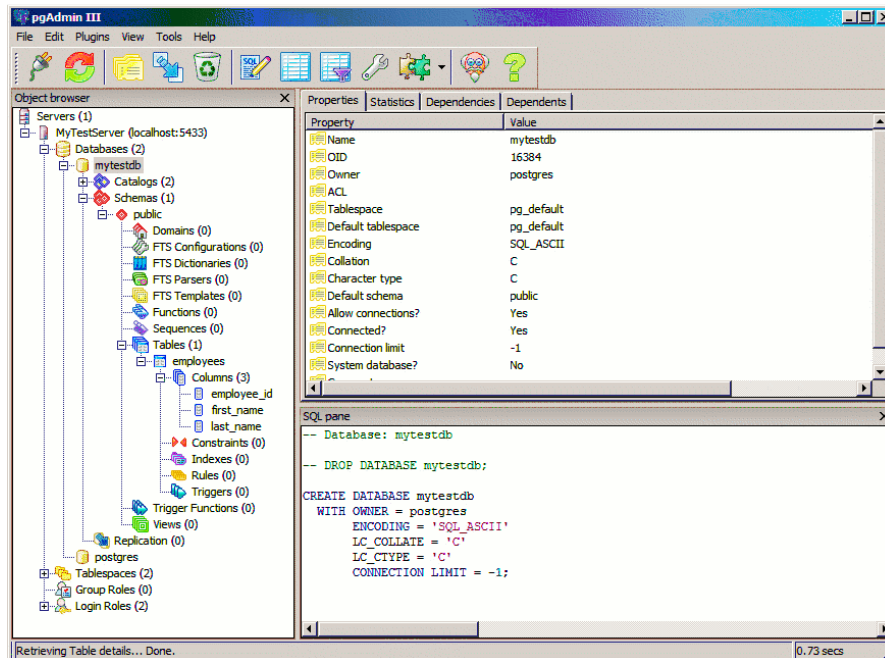
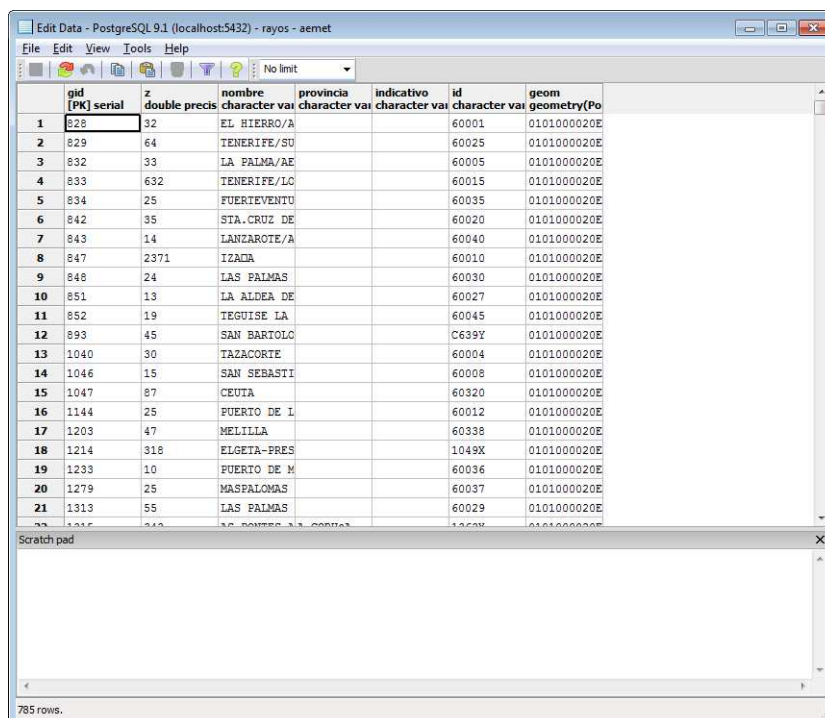


Fig.2 .Vista principal del programa pgAdmin. Fuente: library.linode.com

La base de datos denominada «rayos» parte con tres tablas que contienen los siguientes archivos:

- Una primera tabla con 784 estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) con los siguientes atributos (nombre «aemet»):
 - Identificador propio del software GIS usado.
 - Altitud de la estación (atributo «z»).
 - Nombre de la estación. (atributo «nombre»)
 - Provincia en la que está situada la estación (atributo «provincia»)
 - Indicativo climatológico de la estación (atributo «indicativo»).
 - Identificador propio formado por números sólo o con caracteres alfanuméricos (atributo «id»).
 - Atributo con la geometría para su representación espacial en coordenadas WGS84 (atributo «geom»).



	gid [PK] serial	z double precis	nombre character var	provincia character var	indicativo character var	id character var	geom geometry(Point)
1	828	32	EL HIERRO/A			60001	0101000020E
2	829	64	TENERIFE/SU			60025	0101000020E
3	832	33	LA PALMA/AE			60005	0101000020E
4	833	632	TENERIFE/LO			60015	0101000020E
5	834	25	FUERTEVENTU			60035	0101000020E
6	842	35	STA. CRUZ DE			60020	0101000020E
7	843	14	LANZAROTE/A			60040	0101000020E
8	847	2371	IZADA			60010	0101000020E
9	848	24	LAS PALMAS			60030	0101000020E
10	851	13	LA ALDEA DE			60027	0101000020E
11	852	19	TEGUISE LA			60045	0101000020E
12	893	45	SAN BARTOLO			C639Y	0101000020E
13	1040	30	TAZACORTE			60004	0101000020E
14	1046	15	SAN SEBASTI			60008	0101000020E
15	1047	87	CEUTA			60320	0101000020E
16	1144	25	PUERTO DE L			60012	0101000020E
17	1203	47	MELILLA			60338	0101000020E
18	1214	318	ELGETA-PRES			1049X	0101000020E
19	1233	10	PUERTO DE M			60036	0101000020E
20	1279	25	MASPALOMAS			60037	0101000020E
21	1313	55	LAS PALMAS			60029	0101000020E

Fig.3 .Vista principal de la tabla de atributos AEMET en QGIS. Fuente: elaboración propia.

A continuación se da una pequeña pincelada histórica de los datos de partida. AEMet nació con el nombre de Instituto Central Meteorológico y se creó por Real Decreto de 12 de agosto de 1887, siendo publicado el 18 de agosto de 1887 en la Gaceta de Madrid, a propuesta del Ministro de Fomento, Carlos Navarro Rodrigo, perteneciente al Partido Liberal. Fue la primera institución dedicada al servicio meteorológico en España. La sede elegida para el Instituto fue el edificio de «El Castillo», en el parque de El Retiro de Madrid. Durante la Segunda República, en 1933 pasó a depender de la Dirección General de Aeronáutica del Ministerio de la Guerra. Tras la Guerra Civil, en 1940 todos los servicios meteorológicos se unificaron en el renombrado «Servicio Nacional de Meteorología», que estaba adscrito al Ministerio del Aire. La última reestructuración tuvo lugar en 1978, cuando se renombró Instituto Nacional de Meteorología (INM) y pasó a depender del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Carreras, A. y Tafunell, X., 2005).

La última modificación legal se produjo en 2008, cuando el INM se transformó en Agencia Estatal de Meteorología. (Palomares Calderón, M., 2010)

- Una segunda tabla, de nombre «obs», con datos de observaciones de variables climáticas realizadas por estas estaciones meteorológicas cada 10 minutos, desde el 1 de Noviembre de 2011 al 27 de Noviembre de 2012.
- Esa tabla tiene 42 atributos. En el proyecto se emplean los siguientes:
- Fecha y hora de registro del rayo (atributo «registrora»)

- Identificador de la estación AEMET usada. Es el atributo común con la tabla «obs» (atributo «id»).
- Fecha y hora del registro meteorológico (atributo «fecha»).
- Datos de precipitación en milímetros. (atributo «prec»).
- Datos de presión atmosférica en la estación en hectopascales (atributo «pres»).

	registrora	id	fecha	bat	bath	ca
98	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31 23:10:00	NULL	NULL	NULL
99	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31 23:20:00	NULL	NULL	NULL
100	2011-11-01 04:02:18	08029	2011-10-31 23:30:00	NULL	NULL	NULL

dmax10m	dmaxu10m	dv10m	dvu10m	geo700	geo850
180.0000000000...	NULL	220.0000000000...	NULL	NULL	NULL
230.0000000000...	NULL	210.0000000000...	NULL	NULL	NULL
200.0000000000...	NULL	200.0000000000...	NULL	NULL	NULL

geo925	hr	htamax1h	htamin1h	inso	nieve
NULL	57.0000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL
NULL	55.0000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL
NULL	54.0000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL

pacutp	pliqtp	prec	pres	pres_nmar	psoltp
NULL	NULL	0.0000000000...	1011.299999999...	1012.200000000...	NULL
NULL	NULL	0.0000000000...	1011.399999999...	1012.299999999...	NULL
NULL	NULL	0.0000000000...	1011.399999999...	1012.299999999...	NULL

raglob	rviento	ta	tamax10m	tamax1h	tamin10m
0.0000000000...	6.0000000000...	19.3000000000...	NULL	NULL	NULL
0.0000000000...	10.0000000000...	19.8000000000...	NULL	NULL	NULL
0.0000000000...	6.0000000000...	20.0000000000...	NULL	NULL	NULL

tamin1h	tpr	tpre	tprec	ts	tss20cm
NULL	10.5000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL
NULL	10.5000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL
NULL	10.4000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL

tss5cm	vis	vmax10m	vmaxu10m	vv10m	vvu10m
NULL	NULL	2.1000000000...	NULL	1.1000000000...	NULL
NULL	NULL	4.1000000000...	NULL	1.7000000000...	NULL
NULL	NULL	3.1000000000...	NULL	1.2000000000...	NULL

Fig. 4 .Vista principal de la tabla «obs» en QGIS. Fuente: elaboración propia.

- Una tercera tabla con la información correspondiente de los rayos observados de AEMET, incluyendo errores y precisiones denominada «rayosestudio». Tiene 20 atributos, entre los que destaca la fecha y hora de caída del rayo, semiejes menor y mayor de la elipse de error, el día del año contado desde el 1 al 366 y la intensidad y acimut del rayo, entre otras.

fid	yea	mont	fecha	semimayor
1056590	2011	11	05/11/2011 16:52	0.2
1058627	2011	11	13/11/2011 0:59	0.2
1061565	2011	11	20/11/2011 3:57	0.2
1120453	2012	10	12/10/2012 7:30	0.2

semimenor	chicua	yday	inten	hor
1	1.2	309	-12.8	16
1	1.1	317	-21.8	0
1	1.4	324	-5.1	3
1	0.4	286	-10.3	7

di	minu	mindayint	orddes	acim
5	52	67	1	93.8
13	59	4	6	135.6
20	57	16	3	156
12	30	30	1	132.4
12	5	56	2	130.1

longi	lati
2.475	403.683
-90.617	40.868
0.6329	408.758

Fig.5 . Selección de los atributos de la tabla de rayosestudio en Excel. Fuente: elaboración propia.

Una vez presentadas estas tablas, pasamos a la siguiente fase del trabajo.

2.1 Selección de datos de trabajo

En esta fase pretendemos tratar los datos en bruto y obtener los datos que vamos a usar en esta investigación.

Para ello se va a usar el lenguaje de consulta Structured Query Language (SQL) dentro de las tablas obtenidas en la fase anterior.

El lenguaje de consulta estructurado o SQL (por sus siglas en inglés Structured Query Language) es un lenguaje declarativo de acceso a bases de datos relacionales que permite especificar diversos tipos de operaciones en ellas. Una de sus características es el manejo del álgebra y el cálculo relacional que permiten efectuar consultas con el fin de recuperar de forma sencilla información de interés de bases de datos, así como hacer cambios en ellas.

A partir de las indicaciones del tutor Antonio Vázquez, se concluye que para la investigación se van a utilizar sólo las estaciones donde se hayan registrado impactos de rayos en un entorno de 1500 m a su alrededor, teniendo en cuenta las elipses de error asociadas al punto de impacto.

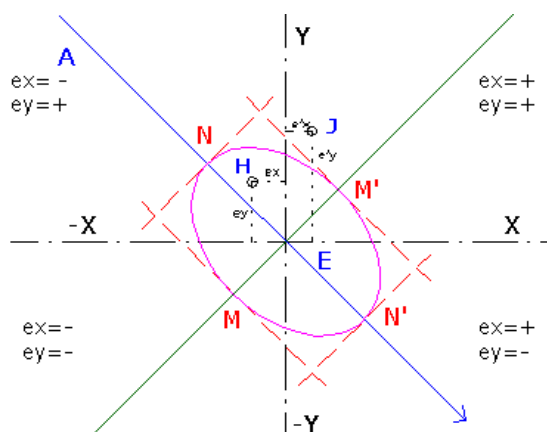


Fig.6 . Elipse de error de una determinada estación. Fuente: www.cartesia.org

Las limitaciones relativas de dichas elipses son las siguientes: el semieje mayor de la elipse de error ha de ser menor o igual de 20, y el error chi-cuadrado de la elipse ha de ser menor o igual de 10.

Para ello se realiza una consulta SQL que crea una nueva tabla, denominada «est_ry1500m» tomando el id y la fecha de las tablas «aemet» y «rayosestudio».

```
create table est_ry1500m as select id, fid, fecha from aemet
A, rayosestudio R where st_DWithin(posicion::geography,
geom::geography, 1500, false) and chicua<=10 and semimayor<=20;
```

	id	fid	fecha	geo
	character va	bigint	timestamp w	geometry(Po
1	08284	1061678	2011-11-20	0101000020E
2	08169	1070532	2012-04-06	0101000020E
3	9321X	1070571	2012-04-06	0101000020E
4	9756X	1076769	2012-05-20	0101000020E
5	8492X	1082560	2012-06-03	0101000020E
6	9513X	1085517	2012-06-27	0101000020E
7	9855E	1084138	2012-06-18	0101000020E
8	9935X	1090684	2012-07-11	0101000020E
9	9436X	1092086	2012-07-25	0101000020E
10	9531Y	1092189	2012-07-25	0101000020E
11	08232	1099502	2012-08-18	0101000020E
12	9744B	1113269	2012-09-23	0101000020E
13	2048A	1116921	2012-10-10	0101000020E
14	9141V	1117148	2012-10-10	0101000020E
15	08179	1117837	2012-10-11	0101000020E

Fig.7 . Vista de la tabla est_ry1500m en pgAdmin. Fuente: elaboración propia.

Para poder representar esta tabla en un software SIG, es necesario añadirle geometría. Para ello, usando dos consultas SQL, se le añaden los datos espaciales de la capa AEMET, cuyo sistema de referencia tiene el código EPSG: 4326, es decir, sistema de coordenadas geográficas WGS84: una consulta incorpora una columna nueva y la otra actualiza esa columna con la geometría de la tabla aemet (en WGS84):

```
alter table est_ry1500m add column geo geometry(point,4326);

update est_ry1500m set geo =(select geom from aemet where
aemet.id = est_ry1500m.id);
```

Una vez obtenida esta tabla, se decide que hay que seleccionar las observaciones registradas en un intervalo de tiempo comprendido entre 5 horas antes y 2 horas después del registro del impacto del rayo.

Para ello se ejecuta la siguiente sentencia SQL, generándose la tabla llamada «Datest_ry1500m»:

```
CREATE TABLE Datest_ry1500m as SELECT E.fecha as
RegistroRayo, O.* from est_ry1500m E, obs O WHERE E.id=O.id
and O.fecha BETWEEN (E.fecha - INTERVAL '5 hours') AND
(E.fecha + INTERVAL '2 hours')
```

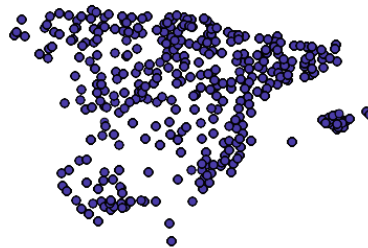


Fig.8 . Representación espacial de la capa “Datest_ry1500m” en QGIS. Fuente: elaboración propia.

La tabla «Datest_ry1500m» tiene 37481 registros. Como el volumen de datos a manejar es muy grande, para hacer más eficiente su trabajo se decide crear un índice espacial usando el método b-tree.

El índice b-tree es el tipo de índice más común en una base de datos. Tiene la forma de un árbol invertido. Las estructuras superiores son las ramas y las inferiores son las hojas. Cada rama de un nivel contiene información sobre otras ramas del nivel inmediatamente inferior.

La consulta realizada ha sido:

```
create index Datest_ry1500m_idx ON Datest_ry1500m USING
btree(id);
```

De ahí pasamos a la siguiente fase.

2.2 Generación de gráficas

2.2.1 Obtención de archivos previos

En esta fase se obtienen las tablas necesarias de presión atmosférica y precipitación distinguiendo entre rayo y tormenta y se generan las gráficas de cada rayo o tormenta.

Al estudiar la tabla de partida «Datest_ry1500m» se observa que no existen registros nulos de los datos de precipitación (37481 filas) pero de presión solo aproximadamente la mitad de datos (15336 filas), siendo los demás nulos, es decir, carentes de valor.

Se decide representar en las gráficas de presión además de la presión atmosférica la presión reducida a nivel del mar, en los casos donde esta última haya sido registrada.

Para obtener los datos de precipitación y presión atmosférica se ejecutan sentencias SQL que piden el id de la estación, la fecha del registro del rayo y el valor de precipitación y presión de los datos que no sean nulos de la tabla Datest_ry1500m.

Precipitación:

```
CREATE TABLE DAT_PREC AS (select ID, REGISTRORAYO, FECHA,
PREC from Datest_ry1500m where PREC is not null ORDER BY ID,
REGISTRORAYO, FECHA);
```

	id character vai	registrorayo timestamp w	fecha timestamp w	prec double precis
1	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
2	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0.2
3	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0.2
4	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0.2
5	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
6	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0.4
7	0009X	2012-04-06	2012-04-06	3.2
8	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0.2
9	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
10	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
11	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
12	0009X	2012-04-06	2012-04-06	0
13	0009X	2012-10-11	2012-10-11	0.4
14	0009X	2012-10-11	2012-10-11	0.2
15	0009X	2012-10-11	2012-10-11	0.2

Fig.9. Vista de la tabla dat_prec en pgAdmin. Fuente: elaboración propia.

Presión:

```
CREATE TABLE DAT_PRESION AS (select ID, REGISTRORAYO, FECHA,
PRES,PRES_nmar from Datest_ryl500m where PRES is not null
ORDER BY ID, REGISTRORAYO, FECHA);
```

	id character vai	registrorayo timestamp w	fecha timestamp w	pres double precis	pres_nmar double precis
1	08002	2011-11-02	2011-11-02	982.3	994.2
2	08002	2011-11-02	2011-11-02	982	993.9
3	08002	2011-11-02	2011-11-02	982.1	994
4	08002	2011-11-02	2011-11-02	982	993.9
5	08002	2011-11-02	2011-11-02	982	993.9
6	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.7	993.6
7	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.8	993.7
8	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.5	993.4
9	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.7	993.6
10	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.9	993.8
11	08002	2011-11-02	2011-11-02	982.1	994
12	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.9	993.7
13	08002	2011-11-02	2011-11-02	981.8	993.7
14	08002	2011-11-02	2011-11-02	982	993.9

Fig. 10. Vista de la tabla dat_presion en pgAdmin. Fuente: elaboración propia.

En ambas tablas aparece la fecha (día y hora) del registro del rayo, la id de la estación que ha recogido la observación, la fecha de la observación (también día y hora) y el valor de la variable correspondiente o las dos variables, en el caso de que existiera presión atmosférica y presión a nivel del mar.

Para separar rayos de familias de rayos, se han considerado familias de rayos todos aquellos impactos de rayos que han sucedido en un intervalo de tiempo menor de una hora. Se ha generado la tabla «rayos_tormenta», con el identificador de las estaciones y con la fecha de principio y fin de ocurrencia de rayos en un intervalo de una hora.

Para obtener los rayos dentro de cada familia de rayos, se ejecutan dos sentencias SQL que obtienen dos tablas («dat_prec_tormenta y dat_presion_tormenta») con los datos de presión y precipitación de familias de rayos a partir de las tablas anteriormente creadas de presión y precipitación.

Presión:

```
CREATE TABLE DAT_PRESION_TORMENTA AS SELECT DISTINCT A.ID,
A.FECHA, A.TA, A.TS, B.MIN, B.MAX FROM DAT_PRESION A,
RAYOS_TORMENTA B WHERE A.ID = B.ID_EST AND A.REGISTRORAYO
BETWEEN B.MIN AND B.MAX ORDER BY A.ID, A.FECHA
```

	id character va	fecha timestamp w	pres double precis	pres_nmar double precis	min timestamp w	max timestamp w
1	08015	2012-06-27	973.3	1010.7	2012-06-27	2012-06-27
2	08015	2012-06-27	973.2	1010.5	2012-06-27	2012-06-27
3	08015	2012-06-27	972.9	1010.1	2012-06-27	2012-06-27
4	08015	2012-06-27	972.8	1010	2012-06-27	2012-06-27
5	08015	2012-06-27	972.7	1009.8	2012-06-27	2012-06-27
6	08015	2012-06-27	972.6	1009.8	2012-06-27	2012-06-27
7	08015	2012-06-27	972.6	1009.8	2012-06-27	2012-06-27
8	08015	2012-06-27	972.4	1009.5	2012-06-27	2012-06-27
9	08015	2012-06-27	972.2	1009.2	2012-06-27	2012-06-27
10	08015	2012-06-27	972	1008.9	2012-06-27	2012-06-27
11	08015	2012-06-27	971.9	1008.8	2012-06-27	2012-06-27
12	08015	2012-06-27	971.8	1008.7	2012-06-27	2012-06-27
13	08015	2012-06-27	971.8	1008.7	2012-06-27	2012-06-27

Fig.11 . Vista de la tabla *dat_presion_tormenta* en *pgAdmin*. Fuente: elaboración propia.

Precipitación:

```
CREATE TABLE DAT_PREC_TORMENTA AS SELECT DISTINCT A.ID,
A.FECHA, A.TA, A.TS, B.MIN, B.MAX FROM DAT_PREC A,
RAYOS_TORMENTA B WHERE A.ID = B.ID_EST AND A.REGISTRORAYO
BETWEEN B.MIN AND B.MAX ORDER BY A.ID, A.FECHA
```

	id character va	fecha timestamp w	prec double precision	min timestamp without tim	max timestamp without time zc
1	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
2	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
3	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
4	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
5	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
6	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
7	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
8	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
9	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
10	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
11	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31
12	08015	2012-06-27	0	2012-06-27 16:56:18	2012-06-27 17:28:31

Fig.12 . Vista de la tabla *dat_prec_tormenta* en *pgAdmin*. Fuente: elaboración propia.

En ambas tablas aparece la id de la estación que ha recogido la observación, la fecha de la observación (día y hora), el valor de la variable correspondiente y la fecha inicial y final de la familia de rayos (también día y hora).

Así, como resumen, se tienen cuatro tablas dentro de la base de datos PostgreSQL: dos de familias de rayos (una de presión y otra de precipitación) y otras dos de rayos (también una de presión y otra de precipitación). Sus nombres son: *dat_presion_tormenta*, *dat_prec_tormenta*, *dat_prec_rayos* y *dat_presion_rayos*.



Para poder realizar las gráficas con estas tablas hace falta exportarlas a archivos con extensiones válidas para el programa a usar. Tras una fase previa de estudio se decide que el programa para realizar gráficas es MATLAB y que los archivos se deben exportar a formato *.csv, que puede ser abierto por Excel y reconocido por MATLAB.

La herramienta usada fue OsGEO4W mediante el comando ogr2ogr.

Como pincelada histórica, Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), es una organización no gubernamental cuya misión es dar soporte y promover el desarrollo colaborativo de tecnologías geospaciales y datos abiertos. Tiene entidad legal de fundación y fue constituida en febrero de 2006 para proporcionar apoyo financiero, legal y organizativo a toda la comunidad geospacial del software libre y el software de código abierto. También sirve, como entidad legal independiente a través de la cual sus miembros pueden realizar contribuciones de código, fondos u otros recursos con la seguridad de que ese conocimiento y el resto de contribuciones estarán disponibles para beneficio de todo el mundo.

La Fundación persigue objetivos más allá del desarrollo de software, tales como promover el acceso libre a los datos geospaciales gubernamentales y a los datos completamente libres, como los generados y mantenidos por el proyecto OpenStreetMap. También se pone especial atención en temas educativos y en capacitación. La Fundación se estructura en diversos comités que trabajan en la implementación de estrategias para la consecución de los objetivos.

OSGeo alberga los siguientes proyectos:

- Bibliotecas espaciales:
 - FDO
 - GDAL/OGR
 - GeoTools
 - GEOS
 - MetaCRS
- Aplicaciones de escritorio:
 - GRASS GIS
 - OSSIM
 - Quantum GIS
 - gvSIG
- Aplicaciones Web:
 - Mapbender
 - MapGuide Open Source
 - MapServer
 - OpenLayers

- deegree
- Catálogos de metadatos:
 - GeoNetwork opensource



Fig.13 . Logotipo de OsGEO4W. Fuente: osgeo.org

Dentro de OsGEO4W, el comando ogr2ogr se encuentra dentro de la herramienta OGR, estando ésta a su vez dentro de la herramienta de FW Tools. Es una línea de comando que convierte cualquier tipo de datos de los programas OGR. Acepta múltiples formatos de datos: ESRI Shapefile, archivo MapInfo Tab, TIGER, s57, DGN, CSV, DBF, GML, KML, PostGIS...

Para exportar las tablas creadas en el trabajo en *.csv, se debe en primer lugar colocar la extensión, nombre y la carpeta donde se va a guardar el archivo descargado, y se especifica el nombre, dominio, usuario, contraseña y nombre de la tabla a exportar (en este caso el mismo nombre que el de la tabla a exportar correspondiente) de la base de datos PostgreSQL.

```
C:\Users\Alba>ogr2ogr -f "CSV" rayosestudio.csv PG:"host=localhost user=postgres
dbname= rayos password= " rayosestudio
Warning 1: Attempt to create field of type DateTime, but this is not supported
for .csv files. Just treating as a plain string.
```

Fig.14 . Ejemplo de uso del comando ogr2ogr para obtener una tabla en formato *.csv. Fuente: elaboración propia.

Así se obtienen cuatro tablas en formato *.csv con el mismo nombre de las tablas de exportación, en las que se puede comenzar a realizar gráficas.

2.2.2 Producción de gráficas

En esta fase se realizan las gráficas con el programa MATLAB de cada una de las tablas anteriores.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, «laboratorio de matrices») es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y servicio de especie. Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de

interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Para generar las gráficas, se decide crear la cantidad de archivos *.m necesarios para realizar la tarea de forma más automática posible, ya que en un principio la cantidad de gráficas previstas era muy grande.

Tipo de gráfica	Variable	Número de gráficas previstas
Familia de rayos	Presión atmosférica	8
Familia de rayos	Precipitación	33
Rayo	Presión atmosférica	276
Rayo	Precipitación	1134

Aparte de la representación gráfica, se decide añadir de alguna forma solo en las gráficas de rayos (no en las de familia de rayos) si existe una pendiente negativa o positiva en la línea creada por los valores de la variable atmosférica en el entorno de la caída del rayo.

Además en la presión atmosférica, se decidió en un primer momento añadir la presión atmosférica a nivel del mar, así que en las observaciones con ambos datos se añade una segunda línea de representación.

En los datos de familia de rayos se aprecia que sólo existe una observación por estación, para facilitar el proceso de generación de gráficas se decide colocar sólo el número de estación.

En las gráficas de familia de rayos aparece en el eje X la hora de las observaciones en formato decimal, en el eje Y el valor de la variable en su unidad correspondiente (presión atmosférica o precipitación) y también aparecen dos líneas verticales que reflejan la hora inicial y final de la familia de rayos. En el título aparece la estación atmosférica.

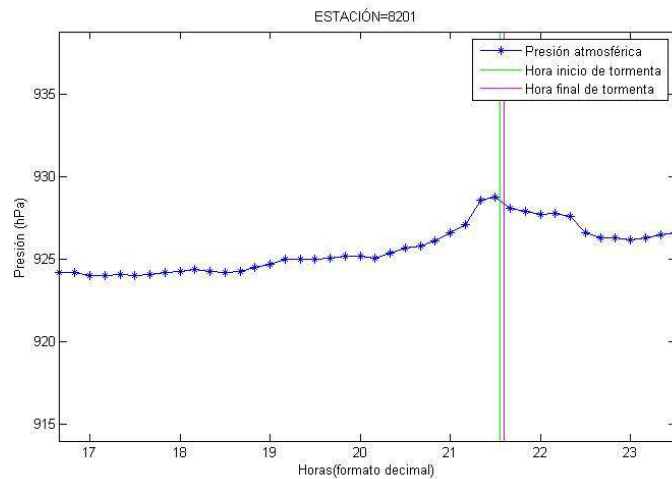


Fig.15 . Gráfica de presión atmosférica de la tormenta registrada por la estación 8201. Fuente: elaboración propia.

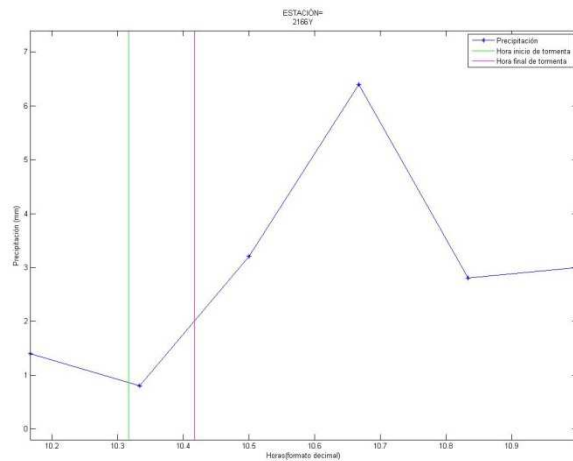


Fig.16. Gráfica de precipitación de la tormenta registrada por la estación 2066Y. Fuente: elaboración propia.

En las de rayos aparece lo mismo en el eje X e Y pero sólo aparece una línea vertical, la del impacto del rayo. En el título aparece la estación atmosférica, la hora y el día de caída del rayo y si la pendiente es negativa o positiva.

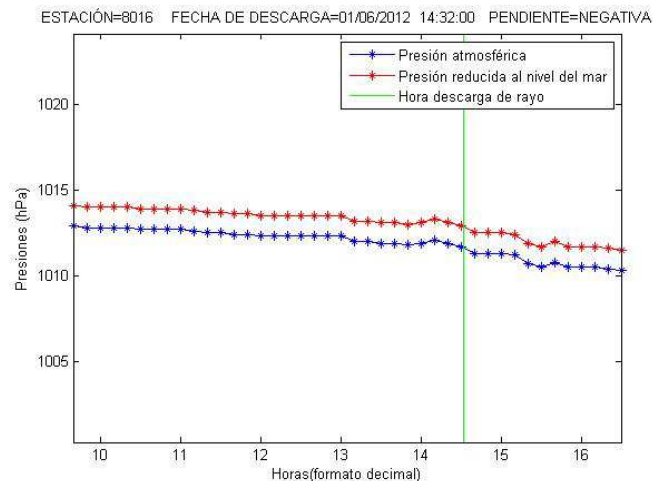


Fig.17 . Gráfica de presión atmosférica en la altura de la estación y a nivel del mar de rayos de la estación con ID=8016 el 01/06/2012 a las 14:32. Fuente: elaboración propia.

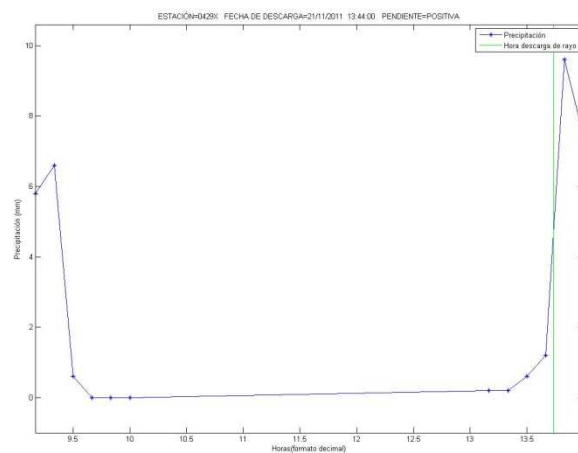


Fig.18 . Gráfica de precipitación del rayo caído en la estación 0429X el 21/11/2011 a las 13:44. Fuente: elaboración propia.

En este punto se profundiza en los archivos usados para la generación de estas gráficas:

En primer lugar, se decidió crear un archivo *.m distinguiendo entre familia de rayo o rayo y entre presión o precipitación, es decir, 4 archivos *.m. Además se decidió dividir el *.m de presión de rayos para representar correctamente la existencia de presión atmosférica a nivel del mar.

En segundo lugar, para leer un *.csv dentro de MATLAB se usa el comando xlsread, el cual se le debe especificar un rango de columnas y devuelve una matriz de dos valores denominados «num» y «text» en el que se guardan las números y las cadenas de texto, respectivamente.

```
[num,text]=xlsread('dat_temp_tormenta.csv','dat_temp_tormenta','A1:E9')
```

```
num =
```

```
1.0e+03 *
```

8.0150	NaN	0.0299	0.0328
8.0150	NaN	0.0304	0.0335
8.0150	NaN	0.0313	0.0343
8.0150	NaN	0.0318	0.0353
8.0150	NaN	0.0321	0.0351
8.0150	NaN	0.0322	0.0336
8.0150	NaN	0.0322	0.0327
8.0150	NaN	0.0330	0.0349

```
text =
```

'	'27/06/2012 12:00:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 12:10:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 12:20:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 12:30:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 12:40:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 12:50:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 13:00:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'
'	'27/06/2012 13:10:00'	'	'	'27/06/2012 16:56:00'

En este ejemplo la id de la estación es un número, por tanto, la guarda en «num» , pero si contiene alguna letra, se convierte a cadena de texto y se guarda en «text»:

```
[num,text]=xlsread('dat_temp_tormenta.csv','dat_temp_tormenta','A449:F454')
```

```
num =
```

```
17.7000  
18.2000  
18.8000  
19.1000  
19.7000  
19.9000
```




text =

Columns 1 through 5

```
'1038X'      '11/06/2012 9:10:00'      ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
'1038X'      '11/06/2012 9:20:00'      ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
'1038X'      '11/06/2012 9:30:00'      ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
'1038X'      '11/06/2012 9:40:00'      ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
'1038X'      '11/06/2012 9:50:00'      ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
'1038X'      '11/06/2012 10:00:00'     ''      ''      '11/06/2012 12:31:00'
```

Column 6

```
'11/06/2012 12:35:00'
'11/06/2012 12:35:00'
'11/06/2012 12:35:00'
'11/06/2012 12:35:00'
'11/06/2012 12:35:00'
'11/06/2012 12:35:00'
```

Por tanto, se decide dividir entre cadena de texto o número según la estación para cada tipo de gráfica. Además estudiando el *.csv de familia de rayos en presión se observa que todas las estaciones contienen letras y números (no existe ninguna estación con sólo números) por lo que sólo se hace esta subdivisión para presión y precipitación de rayos y para precipitación de familia de rayos.

Así, quedan ocho archivos *.m que fueron nombrados de la siguiente forma:

- prec_tormenta_num.m: Gráficas de precipitación de familia de rayos con estación numérica.
- prec_tormenta_text.m: Gráficas de precipitación de familia de rayos con estación con letras y números.
- prec_rayos_num.m: Gráficas de precipitación de rayos con estación numérica.
- prec_rayos_text.m: Gráficas de precipitación de rayos con estación con letras y números.
- presion_tormenta_num1col.m: Gráficas de presión atmosférica en la estación de familia de rayos.
- presion_tormenta_num2col.m: Gráficas de presión atmosférica en la estación y al nivel del mar de familia de rayos.
- presion_rayos_num1col.m: Gráficas de presión atmosférica en la estación de rayos.



- `presion_rayos_num2col.m`: Gráficas de presión atmosférica en la estación y al nivel del mar de rayos.

En esta parte se explica con mucho más detalle el código en general usado, que es parecido en todos. El ejemplo es del archivo `presion_rayos_num1col.m` y el símbolo % significa que el comando no se ejecuta, es un comentario:

```
clear

rango=input('Introduce el rango de datos a calcular= ');

[num,text]=xlsread('dat_presion_rayos.csv','dat_presion_rayos',rango);

t1=input('Colocar ID= ');

t2=input('Colocar fecha= ');
```

En este punto se pide el rango de datos a calcular en un mensaje en pantalla. El rango del csv debe ir entre comillas simples. Además se pide el ID de la estación y la fecha si fuera necesario para colocar el título.

```
a = datevec(text(1:end,2));

c=a(:,4)+ (a(:,5)/60)+ (a(:,6)/3600);

pres=num(:,4);

%pres_nmar=num(:,5);
```

En este punto se lee la fecha de la observación (se convierte a formato decimal) y los valores de la variable atmosférica a representar. La diferencia entre los diferentes archivos está en la forma de leer de estos valores.

```
%pres_total=[pres pres_nmar];

M = max(max(pres));

m = min(min(pres));
```

Se leen los mínimos y máximos de la variable (o variables) a representar para ajustar el eje Y de la gráfica.

```
i=datevec(text(1,1));

impacto=i(:,4)+ (i(:,5)/60)+ (i(:,6)/3600);

%max=datevec(text(1,5));

%max1=max(:,4)+ (max(:,5)/60)+ (max(:,6)/3600);
```

La fecha de impacto del rayo (o de inicio y final de la tormenta) se convierte a formato decimal.

```
plot(c,pres,'b-*)  
  
hold on  
  
%plot(c,pres_nmar,'r-*)  
  
plot([impacto impacto],[m-10 M+10],'g-')  
  
%plot([max1 max1],[m-5 M+5],'m-')
```

Se representan los diferentes valores que aparecen en la gráfica.

%ojo!! Si el rayo está fuera de rango, hay que desactivar de la línea 31 a 49 y activar la 51.

```
% Y viceversa!!!!  
  
% axis([c(1) c(length(c)) m-10 M+10])  
  
% n=[c;impacto];  
  
% norder=sort(n);  
  
% c2=[c;0];  
  
% resta=norder-c2;  
  
% h=1;  
  
% while(resta(h)==0)  
  
% posicion=h;  
  
% h=h+1;  
  
% end  
  
% pend=(pres(posicion+1)-pres(posicion))/(c(posicion+1)-c(posicion));  
  
%  
  
% if pend<0  
  
% title(['ESTACIÓN=',t1,' FECHA DE DESCARGA=',t2,'  
PENDIENTE=NEGATIVA'])  
  
% elseif pend>0  
  
% title(['ESTACIÓN=',t1,' FECHA DE DESCARGA=',t2,'  
PENDIENTE=POSITIVA'])  
  
% else pend=0;  
  
% title(['ESTACIÓN=',t1,' FECHA DE DESCARGA=',t2,'  
PENDIENTE=NULLA'])  
  
% end
```

En este punto se representa la fórmula para definir si la pendiente es negativa o positiva. De forma resumida, lo que se hace es añadir la hora del impacto a la columna de las horas de las observaciones. Esta nueva columna se ordena ascendentemente y

se resta valor con valor con la columna de la hora de las observaciones original. El último valor nulo de la matriz resta determina la posición de la matriz de horas de observaciones a partir de la cual se calcula su pendiente con el siguiente valor. De forma esquemática:

Columna de observaciones.	Columna nueva	Columna resta
9:00:00=9	9:00:00	0
9:10:00=9,16666	9:10:00	0
9:20:00	9:20:00	0
9:30:00	9:25:00	-0,05
9:40:00	9:30:00	
Hora de caída del rayo: 9:25:00	9:40:00	

La última posición nula es la que ocupa la posición (3,1) de la matriz resta, con lo que a partir del valor de la matriz de observaciones que ocupa esta misma posición y la siguiente (4,1) se calcula la pendiente.

Esto solo se calcula para rayos, no para familia de rayos.

Todo este código se debía desactivar si el rayo estaba fuera de rango, es decir, cuando la hora de impacto del rayo no entraba dentro del rango de las horas de observaciones. Un ejemplo de esto lo constituye la siguiente gráfica:

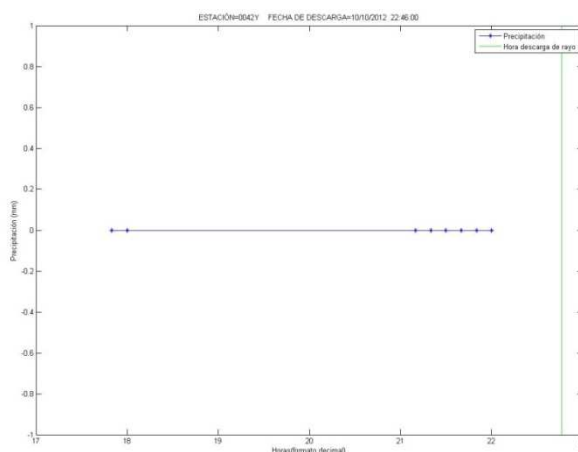


Fig.19 . Gráfica de precipitación para el rayo caído en la estación 0042Y el día 10/10/2012 a las 22:46. Fuente: elaboración propia.



```
title(['ESTACIÓN=',t1,'      FECHA DE DESCARGA=',t2])

xlabel('Horas(formato decimal)')

ylabel('Presión (hPa)')

legend('Presión atmosférica', 'Hora descarga de rayo')
```

Esta última parte del código coloca el título, la leyenda y las etiquetas de ambos ejes.

Una vez realizadas las gráficas, éstas se guardan en formato *.jpg. El nombre elegido para cada uno de los archivos es:

Familia de rayos= nombre de la estación.jpg

Rayos= estación_DDMMAA_HHMM.jpg

2.2.2.1 Corrección de las gráficas

En esta fase, una vez que se estudiaron las gráficas realizadas en el paso anterior, se decidió que debían realizarse de nuevo las gráficas de presión con una amplitud fija del eje Y (en la primera fase la amplitud del eje Y se adaptaba a los valores a representar) y eliminando de las gráficas la presión atmosférica a nivel del mar, porque hacían ampliar el eje Y de la gráfica al existir bastante diferencia entre la línea que la representaba y la de la presión atmosférica de la estación y no aportaba información relevante.

Además se eliminaron las gráficas fuera de rango tanto de presión como de precipitación, porque poco o nada aportaban a la investigación.

Con estas nuevas gráficas se pueden comparar gráficas de estaciones diferentes con más exactitud al ser las gráficas iguales o muy similares.

Con esta acción se desechan las gráficas de presión realizadas en la primera fase.

Así, se crean nuevos archivos *.m para realizar las nuevas gráficas de presión:

presion_rayos_v2.m: Gráficas de rayos.

presion_tormenta_v2.m: Gráficas de familia de rayos.

El cambio básicamente se resume en el siguiente código (en este caso el archivo es presion_rayos_v2.m):

```
M = max(max(pres));

m = min(min(pres));

Med = mean(pres);
```

```

i=datevec(text(1,1));

impacto=i(:,4)+ (i(:,5)/60)+ (i(:,6)/3600);

if (M-Med)<=2.5 &&(Med-m)<= 2.5

plot(c,pres,'b-*)

hold on

plot([impacto impacto],[Med-2.5 Med+2.5],'g-')

axis([c(1) c(length(c)) Med-2.5 Med+2.5])

else

plot(c,pres,'b-*)

hold on

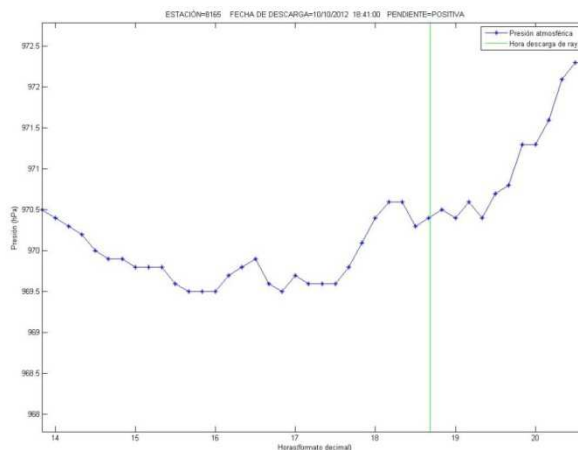
plot([impacto impacto],[Med-(Med-m)-0.5 Med+(M-Med)+0.5],'g-')

axis([c(1) c(length(c)) Med-(Med-m)-0.5 Med+(M-Med)+0.5])

end

```

En él se calcula la media, el mínimo y el máximo de los valores de la representación y se estudia si la diferencia entre el máximo y la media de los valores a representar o esta media y el mínimo es superior a 2,5. Si no es superior, la amplitud de la gráfica es de 5 hPa; en caso contrario la amplitud de la gráfica es la de la diferencia entre los valores multiplicado por 2 (para ambas partes: superior e inferior) y sumando 1 (0,5 en la parte superior y 0,5 en la parte inferior) para garantizar una perfecta representación de todos los valores dentro del gráfico.



*Fig.20 . Gráfica de presión para el rayo registrado por la estación 0165 el 10/10/2012 a las 18:41.
Fuente: elaboración propia.*

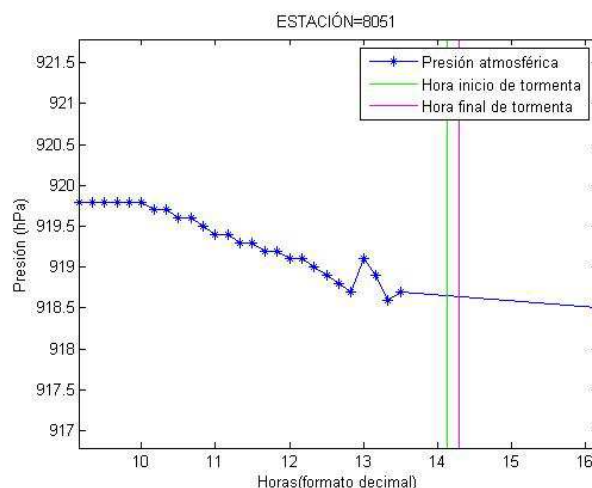


Fig.21 . Gráfica de presión para la familia de rayos registrada por la estación 8051. Fuente: elaboración propia.

En este caso el nuevo número de gráficas que forman el trabajo son:

Tipo de gráfica	Variable	Número de gráficas (% del total)
Familia de rayos	Presión atmosférica	6 (75%)
Rayo	Presión atmosférica	124 (63,63 %)
Familia de rayos	Precipitación	21 (44,92 %)
Rayo	Precipitación	369 (32,53 %)

En este punto, se realizan todavía dos fases de gráficas más usando la precipitación junto con la temperatura en histogramas, amplia y detalladamente explicadas en el Trabajo Fin de Máster complementario a éste (Estudio de la actividad de rayos y su relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación en España (Cernuda, S., 2014))

2.2.2.2 Clasificación de las gráficas

En esta fase se clasifican las gráficas según sus características.

En este punto se tienen aproximadamente 390 gráficas de precipitación y 130 de presión, repartidas entre rayos y tormentas. Para tener organizadas estas gráficas, se decide hacer una clasificación en gráficas de mañana, tarde y de noche. La condición a estudiar es que las horas representadas (eje X) de la gráfica estén entre las siguientes horas:

- Mañana- Horas entre 07:00 y 15:00

- Tarde- Horas entre 15:00 y 23:00
- Noche- Horas entre 23:00 y 06:00.

En el caso de que alguno de los límites tenga representación en la gráfica (por ejemplo de 12:00 a 19:00) se estudiaba cuál intervalo (mañana, tarde o noche) tenía mayor amplitud dentro de las horas representadas en la gráfica y ese intervalo clasifica la gráfica. Si las horas representadas de cada intervalo son las mismas, se estudia en qué intervalo está la hora de descarga del rayo y se clasifica escogiendo ese intervalo.

Debido además a la existencia a gráficas con nombres similares de presión y precipitación (misma estación y misma fecha de rayo) se decidió colocar en la parte final del nombre de cada gráfica una barra baja seguida de un sufijo con una letra indicando el tipo de gráfica que representa. Así, para la presión el sufijo es P y para la precipitación R (de rain, precipitación en inglés).

Así, se obtienen el siguiente número de gráficas clasificadas:

Tipo de gráfica	Variable	Criterio de clasificación	Número de gráficas (% de su categoría)
Familia de rayos	Presión atmosférica	MAÑANA TARDE NOCHE	2 (33,33 %) 4 (66,66 %) 0 (0 %)
Rayo	Presión atmosférica	MAÑANA TARDE NOCHE	61 (49,19 %) 43 (34,67 %) 20 (16,12 %)
Familia de rayos	Precipitación	MAÑANA TARDE NOCHE	10 (47,62 %) 8 (38,09 %) 3 (14,29 %)
Rayo	Precipitación	MAÑANA TARDE NOCHE	169 (45,80%) 143 (38,75 %) 57 (15,49%)

Una vez realizada esta clasificación, se decide realizar otra subclasificación de la primera clasificación dividiendo las gráficas en buenas, malas y regulares debido a que en algunas gráficas existen intervalos de tiempo sin datos. Las condiciones de esta subclasificación son:

- Buenas: no existen intervalos sin datos de la variable alrededor de la hora de descarga del rayo ni en toda la gráfica.
- Regulares: no existen intervalos sin datos de la variable alrededor de la hora de descarga del rayo pero si existen en alguna parte de la gráfica.
- Malas: existen intervalos sin datos alrededor de la hora de descarga del rayo.

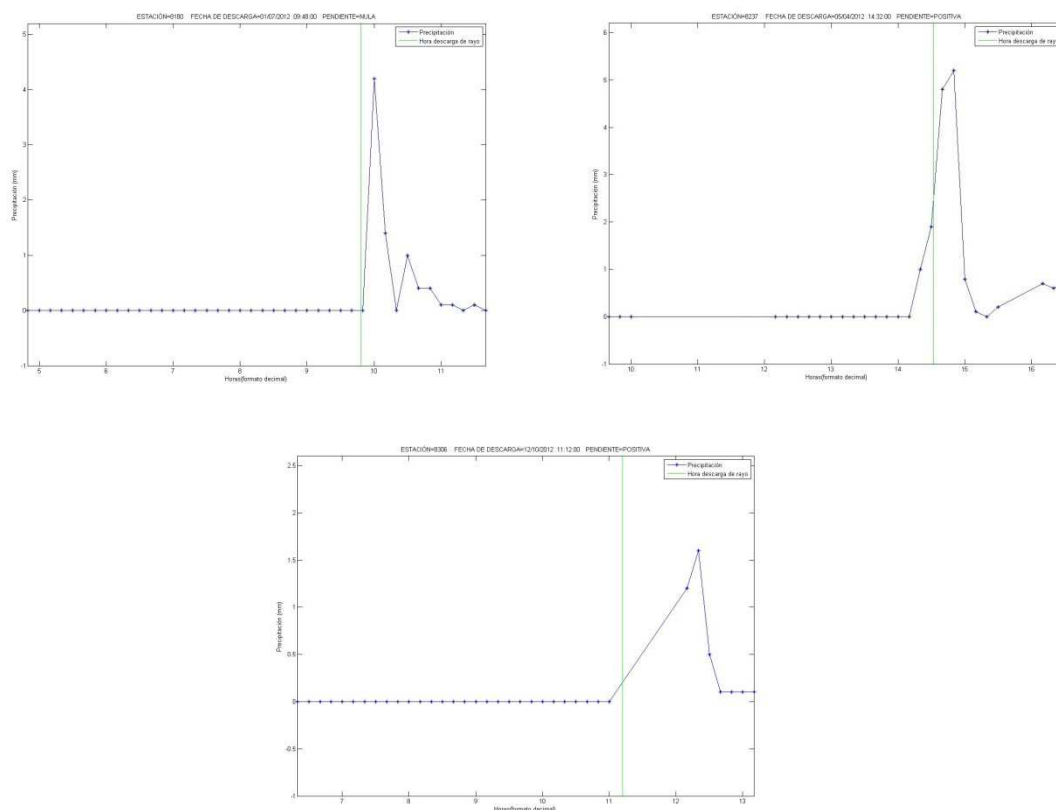


Fig.22 . Ejemplo de gráficas clasificada como buenas, regulares y malas, respectivamente. Fuente: elaboración propia.

El número de gráficas clasificadas de nuevo es:

Tipo de gráfica	Variable	Criterio de clasificación	Criterio de subclasificación	Número de gráficas (% del total de su categoría)
Familia de rayos	Presión atmosférica	MAÑANA	BUENAS REGULARES MALAS	0 (0%) 1 (50%) 1 (50%)
Familia de rayos	Presión atmosférica	TARDE	BUENAS REGULARES MALAS	4 (100%) 0 (0%) 0 (0%)
Familia de rayos	Presión atmosférica	NOCHE	BUENAS REGULARES MALAS	0 (0%) 0 (0%) 0 (%)
Rayo	Presión atmosférica	MAÑANA	BUENAS REGULARES MALAS	45(73,77%) 6 (9,83%) 10(16,39%)
Rayo	Presión atmosférica	TARDE	BUENAS REGULARES MALAS	38(88,37%) 4(9,30%) 1(0,43%)



Rayo	Presión atmosférica	NOCHE	BUENAS REGULARES MALAS	18 (90%) 0(0%) 2(10%)
Familia de rayos	Precipitación	MAÑANA	BUENAS REGULARES MALAS	3 (30%) 6 (60%) 1 (10%)
Familia de rayos	Precipitación	TARDE	BUENAS REGULARES MALAS	6 (75%) 2 (25%) 0 (0%)
Familia de rayos	Precipitación	NOCHE	BUENAS REGULARES MALAS	0 (0%) 2 (66%) 1 (33%)
Rayo	Precipitación	MAÑANA	BUENAS REGULARES MALAS	75(44,37%) 33(19,52%) 61(36,09%)
Rayo	Precipitación	TARDE	BUENAS REGULARES MALAS	64(44,75%) 25(17,48%) 54(37,76%)
Rayo	Precipitación	NOCHE	BUENAS REGULARES MALAS	31(54,38%) 14(24,56%) 12(23,52%)

En el Anexo A aparecen las gráficas clasificadas como buenas. En total son 284 gráficas.

Todavía se realizan todavía dos fases de gráficas más usando la precipitación junto con la temperatura en histogramas, ampliamente explicadas en el Trabajo Fin de Máster complementario a éste (Estudio de la actividad de rayos y su relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación en España (Cernuda, S., 2014)).

3. Obtención de zonas de interpolación

En esta fase se estudian las gráficas realizadas en el paso anterior y se determinan las fechas y zonas de interpolación.

A través del estudio de las gráficas se determinaron una serie de 8 zonas de estudio repartidas por la Península con unas características topográficas, climáticas y de tipo de cultivo específicas:

Sector costero

Llano (sin consideración del relieve). Estaciones sugeridas: Matalascañas, Marismas

Montuoso de barlovento. Estaciones sugeridas: Cudillero, Litoral asturiano

Montuoso de sotavento. Estaciones sugeridas: Dalías, Costa almeriense

Sector Interior

Llano (sin consideración del relieve)

Secanos. Estaciones sugeridas: Alcázar de San Juan, La Mancha.

Regadíos. Estaciones sugeridas: Lleida, Pla de Lleida.

Montuoso

Sector con estaciones a sotavento. Estaciones sugeridas: Riaño, Cordillera Cantábrica Sur.

Sector con estaciones a barlovento. Estaciones sugeridas: Ubrique, Sierra de Grazalema.

Sector con estaciones de dos vertientes. Estaciones sugeridas: Navacerrada, Sistema Central.

En este trabajo se ha usado el software geográfico QGIS. QGIS es una cruz-plataforma (Linux, Windows, Mac) de aplicación de código abierto con muchas características comunes y funciones de SIG y que forma parte del proyecto OsGEO.



Fig.23 . Logotipo del software geográfico QGIS. Fuente: qgis.org

Partiendo de la capa de aemet que está en WGS84 se decide en primer lugar transformarlo a coordenadas proyectadas y planas para la perfecta creación de los búferes o zonas de influencia (60 y 100 km). Así se crea la capa aemet_UTM.shp con proyección UTM H30, WGS84.

Con esta nueva capa se estudia la estación de AEMet central de cada búfer y se obtiene cada una de las zonas de estudio con ayuda de la herramienta de creación de zona de influencia de QGIS:

3.1 Sector costero: Llano

Como su propio nombre indica, la costa presenta una orografía llana. La estación sugerida de Matalascañas se encuentra en las costas de la provincia de Huelva, cerca

del Parque Nacional de Doñana. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en Almonte, en pleno Doñana, cuyo código AEMet es 5858X:

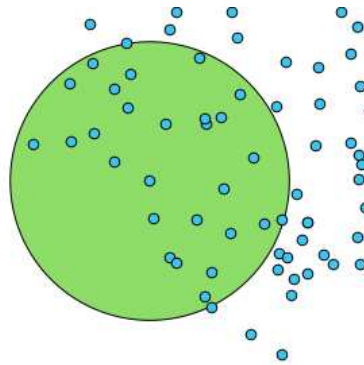
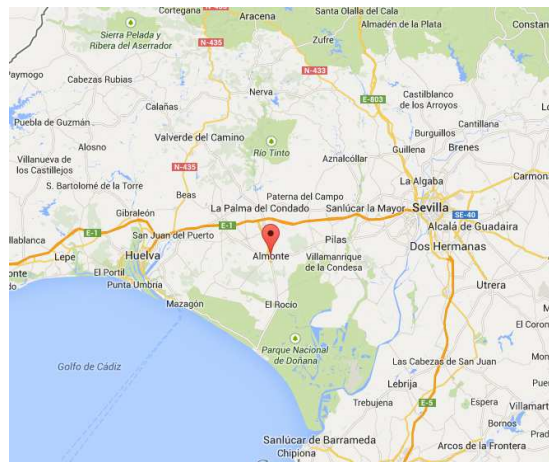


Fig.24 . Vista general de la ciudad de Almonte en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.2 Sector costero montañoso: Barlovento

Como su propio nombre indica, la costa es montañosa y es de barlovento, es decir, la estación se sitúa en la ladera que recibe el viento mayoritario. La estación sugerida de Cudillero se encuentra en la costa occidental del Principado de Asturias. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en Avilés, cuyo código AEMet es 08011:

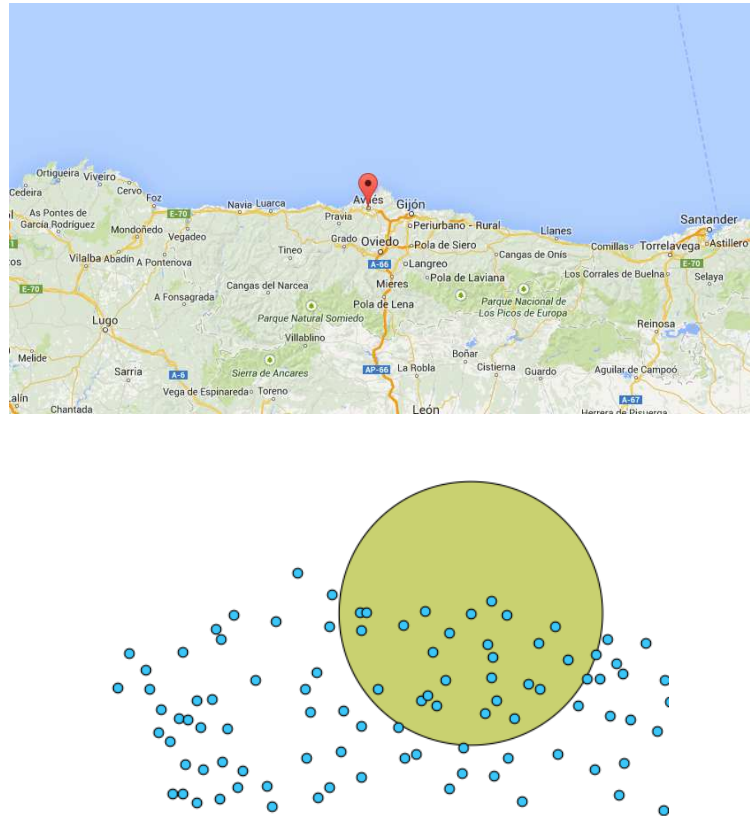


Fig.25 . Vista general de la ciudad de Avilés en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.3 Sector costero montañoso: Sotavento

Como su propio nombre indica, la costa es montañosa y es de sotavento, es decir, la estación se sitúa en la ladera que está resguardada del viento predominante. La estación sugerida de Dalías se encuentra en la costa occidental de la provincia de Almería. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en El Ejido, cuyo código AEMet es 6291B:



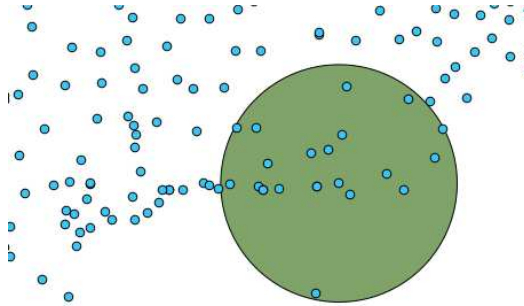


Fig.26 . Vista general de la ciudad de El Ejido en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.4 Sector interior llano: Regadío

Como su propio nombre indica, se encuentra en terreno llano e interior y su principal tipo de cultivo es el de regadío. La estación sugerida de Lleida se encuentra al SE de la provincia de su mismo nombre. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en Mollerussa, al este de Lleida, cuyo código AEMet es 9729X:

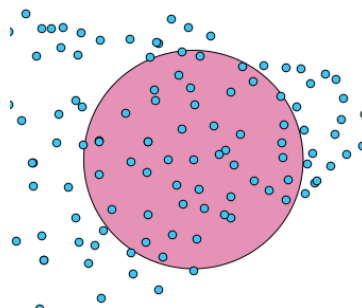


Fig.28 . Vista general de la ciudad de Mollerussa en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.5 Sector interior llano: Secano

Como su propio nombre indica, se encuentra en terreno llano e interior y su principal tipo de cultivo es el de secano. La estación sugerida de Alcázar de San Juan se encuentra al NE de la provincia de Ciudad Real. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en esta ciudad, cuyo código AEMet es 4064Y:

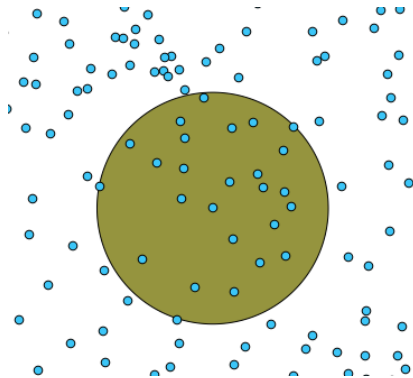


Fig.27 . Vista general de la ciudad de Alcázar de San Juan en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.6 Sector interior montañoso con estaciones a sotavento

Como su propio nombre indica, se encuentra en terreno montañoso y a sotavento. La estación sugerida de Riaño se encuentra al NW de la provincia de León. Estudiando la zona se toma como estación central la del mismo nombre, cuyo código AEMet es 2624C:

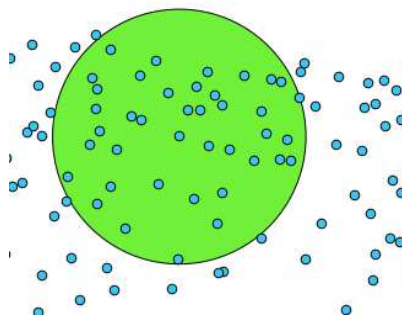
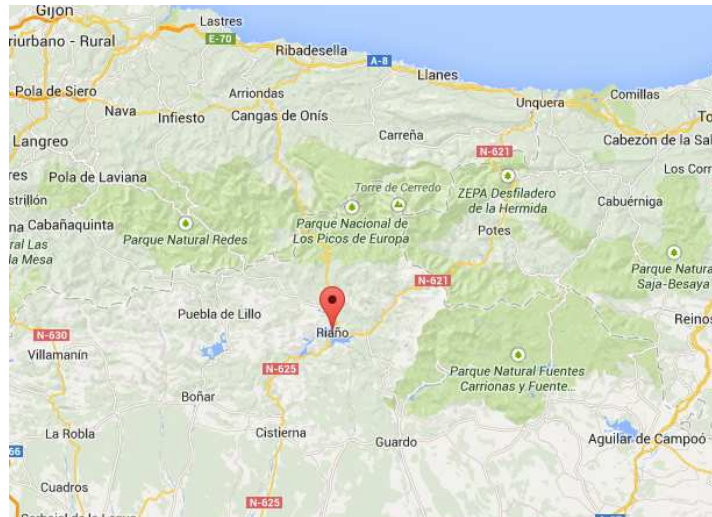


Fig.29 . Vista general de la ciudad de Riaño en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.7 Sector interior montañoso con estaciones a barlovento

Como su propio nombre indica, se encuentra en terreno montañoso y está a barlovento. La estación sugerida de Ubrique se sitúa al norte de la provincia de Cádiz. Estudiando la zona se toma como estación central la de Grazalema, al norte de Ubrique, cuyo código AEMet es 08455:



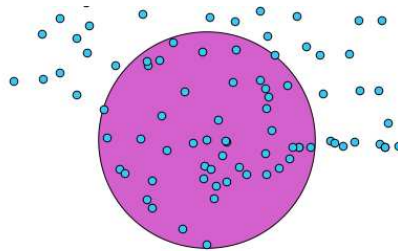


Fig.30 . Vista general de la ciudad de Grazalesma en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

3.8 Sector interior montañoso con estaciones a dos vertientes

Como su propio nombre indica, se encuentra en terreno montañoso y tiene tanto zonas a barlovento como a sotavento. La estación sugerida de Navacerrada se sitúa la sierra del mismo nombre, al norte de la Comunidad de Madrid. Estudiando la zona se toma como estación central la situada en la estación de esquí del mismo nombre, cuyo código AEMet es 08215:

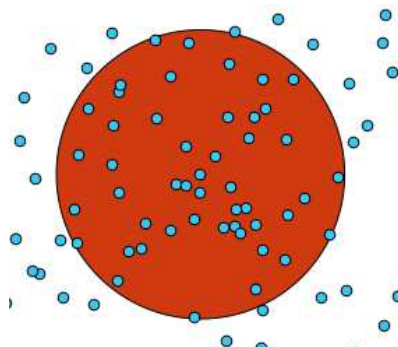


Fig.31 . Vista general de la ciudad de Navacerrada en Google Maps y vista del búfer de 100 km con las estaciones de AEMet en QGIS.

Así en total se obtienen 16 capas, con ocho zonas y dos capas cada una (60 y 100 km).

4. Aplicación de la interpolación

En esta fase se obtienen los archivos a interpolar y se aplican diferentes métodos de interpolación usando diferentes software.

4.1 Estado del arte

El rayo como descarga eléctrica es un fenómeno natural de enorme peligro para la sociedad. El rayo causa anualmente un promedio de 7000 muertos y 15000 heridos, produce numerosos y graves fallos en instalaciones eléctricas y supone la segunda causa de siniestros en el hogar. Las posibilidades de tratamiento de su acción se han multiplicado en los últimos con las nuevas tecnologías, tanto en la recogida de información como en la gestión de datos.

Existen diversas formas de gestionar estos datos, por ejemplo para la prevención de incendios forestales (Rodríguez-Pérez et al., 2013) o para este trabajo, cuyo objetivo principal es estudiar la relación de causalidad entre el fenómeno del rayo y las condiciones del contexto geográfico en el que se produce la descarga eléctrica, considerando especialmente las variables del entorno, en concreto presión del aire y precipitación, a partir del estudio de los datos obtenidos por REDRA (Red de Detección de Rayos) desde octubre de 2011 a noviembre 2012 en España.

Son numerosos los trabajos en las que se usa la interpolación de variables climáticas con diversos conjuntos de datos de todos los continentes: desde la región española de Extremadura (Moral, 2010) hasta Brasil (Borges et al., 2013).

La mayoría de los trabajos anteriores se centran en la comparación de varios métodos aplicados a la interpolación de estas variables climáticas (mayormente de precipitación, y de valores medios mensuales y anuales): precipitación diaria en China (Sun et al. 2014); temperatura y precipitación en el valle del Ebro (Vicente-Serrano et al., 2003) o México (Dewi Hartkamp et al., 1999) o precipitación en la isla caribeña de Santa Lucía (Sarangi et al., 2004).

La mayoría de los trabajos usan el kriging en sus diferentes variables o el cokriging con el modelo digital de elevaciones como métodos de interpolación, aunque también existen otros métodos de interpolación como regresión lineal (Camera, 2012) o IDW (Samanta et al., 2012) métodos mixtos y novedosos como kriging con deriva externa (Aalto et al, 2013).



También algunos trabajos intentan demostrar la existencia de tendencias por ejemplo de precipitación a través de diferentes tests y métodos estadísticos realizados a los métodos de interpolación (Yavuz et al., 2012).

Después de estudiar los artículos, se llega a la conclusión de que la fiabilidad de los diferentes métodos de interpolación depende del conjunto de datos y de la zona de estudio, aunque existen algunas tendencias generales. Para la presión atmosférica, se utiliza el *co-kriging* ordinario con el modelo digital de elevaciones como variable auxiliar, el *thin plate spline* y la regresión múltiple. Para la precipitación, el *co-kriging* ordinario, el inverso de la distancia (IDW) y la regresión dan resultados aceptables. El inverso de la distancia (IDW) no es una técnica de interpolación adecuada para los datos de presión.

Como conclusión, a la hora de interpolar la mejor opción es comparar los errores que dan los diferentes métodos de interpolación para la misma zona y, a partir de ahí, sacar conclusiones.

4.2 Trabajos previos

4.2.1. Obtención de fechas de interpolación

En cuanto a las fechas de interpolación, estudiando las gráficas, se determinan diez fechas que representan características físicas dignas de estudio y que son las fechas a interpolar. Éstas son:

Alta presión atmosférica

26 de noviembre de 2011

26 de diciembre de 2011

26 de marzo de 2012

26 de junio de 2012

Baja presión atmosférica

25 de octubre de 2011

15 de enero de 2012

30 de abril de 2012

26 de julio de 2012

Calor extremo

10 de agosto de 2012

Frío extremo

12 de febrero de 2012

En cuanto a las horas, se determina que las horas de estudio sean al amanecer y a la hora de máxima altura del sol. Así, se eligen las seis de la mañana (06:00) y las dos de la tarde (14:00).

4.2.2 Obtención de archivos de interpolación

Partiendo de las zonas y las fechas con su hora elegidas, en esta fase se obtienen las tablas de datos que van a ser la base de la interpolación.

Para ello se usan sentencias SQL que eligen las observaciones a las estaciones de cada zona (60 y 100 km) de cada día y a cada hora. Para que haya datos suficientes, se obtienen observaciones una hora antes y otra después de las horas establecidas. Así, se obtienen observaciones de cinco a siete de la mañana y de la una a las tres de la tarde.

Concretamente, en las observaciones se piden todas las características del archivo obs. De cada capa de las estaciones se pide el nombre, el id, la provincia, la altura y la geometría (WGS84, UTM 30). Previamente, para poder realizar la consulta, se cargan los datos, de cada una de las capas con las estaciones de cada zona, en la base de datos con nombre similar al de la capa. Por ejemplo, `int_costa_barlovento_100.shp` se convierte a una tabla titulada `costa_blv100`.

```
create table costa_Blvl00_APr_110926 as select O.*, N.geom,
N.z, N.nombre, N.provincia, N.id_1 as Est_centro FROM OBS O,
costa_blvl00 as N where O.id=N.id and ( ( fecha>'2011-09-26
5:00:00' and fecha<'2011-09-26 7:10:00') OR ( fecha>'2011-09-26
13:00:00' and fecha<'2011-09-26 15:10:00') );
```

Cada una de las tablas creadas tiene el nombre de la tabla de la que proviene junto a un sufijo con la característica de la fecha y la fecha en formato año/mes/día.

vmaxu10m	vv10m	vvu10m	z	nombre	provincia	est_centro
NULL	3.800000000000...	NULL	63	CABO BUSTO	NULL	08011
NULL	2.900000000000...	NULL	127	ASTURIAS/AVILÉS...	NULL	08011
NULL	2.600000000000...	NULL	5	GIJÓN MUSEL	NULL	08011
NULL	0.300000000000...	NULL	240	CAMUÑO	ASTURIAS	08011

Fig.32 . Selección de los atributos de la tabla `costa_blv60_apr_110126` en QGIS. Fuente: elaboración propia.

Así se crean 160 tablas, 10 tablas para cada una de las 16 zonas (ocho de 100 km y ocho de 60 km).

4.2.3 Obtención del Modelo Digital de Elevaciones

Como aparece en el estado del arte, algunos métodos como el co-kriging y la regresión múltiple necesitan además de la variable a interpolar otra variable secundaria. En este trabajo la variable secundaria la constituye el modelo digital de elevaciones de las zonas a estudiar.

El modelo digital de elevaciones (MDE) de España se puede obtener de forma gratuita desde el centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica previo registro en su base de datos.

El catálogo de descargas tiene acceso a la descarga de todas las hojas de España de una gran cantidad de productos, tanto en formato ráster como en vector, así como cartografía histórica.

De esta forma se tiene acceso, por ejemplo, a las hojas del PNOA, MTN25 Ráster, BCN 25, MTN 05 obtenido por Lidar, Cartociudad, etc.



Fig.33 . Selección de acceso a las hojas del catálogo de descargas del CNIG. Fuente: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do>

En este trabajo se decide partir de las hojas del MDT25, es decir, del Modelo Digital de Terreno con paso de malla de 25 m. Estas hojas siguen la distribución del MTN50, están en formato ASCII y con proyección UTM siempre con huso 30 y con husos 29 o 31 donde corresponda. Este MDT25 se obtiene a partir de modelos digitales de terreno de 5m del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea).



Así, se hace un plan del número de hojas a descargar para cada zona siguiendo la numeración del MTN50 y estableciendo franjas de hojas que cubran perfectamente la zona de estudio.

Zona de estudio	Hojas del MTN25 a descargar (principios y finales incluidos)	Total de hojas a descargar
Costero Llano	917 a 919 937 a 941 958 a 963 998 a 1004 980 a 985 1017 a 1021 1033 a 1036 1047 a 1050 1061 a 1064 1068 a 1070 1073	49
Costero Barlovento	10 a 15 25 a 31 49 a 55 74 a 80 99 a 105 125 a 131	41
Costero Sotavento	972 993 a 996 1009 a 1015 1025 a 1031 1040 a 1046 1054 a 1060	32
Interior Llano Secano	583 a 584 605 a 609 629 a 634 656 a 662 684 a 690 710 a 716 736 a 741 759 a 764 784 a 788 812 a 813	53
Interior Llano Regadío	180 a 181 213 a 216 250 a 254 287 a 293 325 a 331 356 a 363	65



	385 a 392 413 a 420 442 a 448 469 a 473 496 a 498 521 a 522	
Montuoso Sotavento	14 a 15 28 a 34 52 a 59 78 a 84 103 a 109 128 a 135 160 a 165 194 a 198 232 a 236 271 a 272	56
Montuoso Barlovento	964 a 965 984 a 987 1000 a 1007 1018 a 1024 1033 a 1040 1047 a 1054 1061 a 1067 1069 a 1072 1073 a 1075 1077 a 1078	53
Montuoso Dos Vertientes	372 a 375 400 a 404 427 a 433 454 a 460 480 a 486 505 a 512 530 a 537 555 a 562 578 a 583 602 a 605 628 a 629	66

Así, se descargan cada una de las hojas (es necesario ir de una a una) y se escogen las que tienen Huso 30, ya que es el que usa en el proyecto. Todos los archivos están numerados con el nombre MTN25 seguido de una barra baja con el nombre de hoja y el huso. Ej: MTN25_0964_H30.asc

```

NCOLS 1225
NROWS 801
XLLCENTER 276800
YLLCENTER 4152200
CELLSIZE 25
NODATA_VALUE -999
55.64 56.388 56.041 54.462 53.112 51.973 50.9 49.96 48.982 48.166 50.706 51.798 52.4
55.269 55.922 55.586 54.352 53.051 51.876 50.755 49.711 48.222 48.284 50.573 51.542
54.978 55.651 55.449 54.349 53.107 51.897 50.8 49.697 47.725 46.634 49.745 51.059 51
54.801 55.512 55.281 54.353 53.223 51.988 50.882 49.547 47.596 45.561 48.041 50.259
54.501 55.21 55.169 54.166 53.074 52.156 51.078 49.467 47.677 45.87 48.695 50.399 51
54.097 54.703 55.149 54.135 52.944 52.219 51.286 49.752 47.656 45.524 49.044 50.714
53.764 54.096 54.565 53.975 52.85 51.979 51.172 49.981 47.447 46.153 49.558 50.891 5
53.931 53.96 54.57 53.711 52.56 51.503 50.795 49.912 49.3 49.965 50.4 50.938 51.608
54.093 53.645 53.261 52.076 51.063 50.468 50.425 49.882 49.014 46.797 48.234 50.681
51.997 50.392 50.01 50.392 51.083 51.352 50.862 49.645 47.666 45.173 46.977 50.082 5
50.062 51.154 52.442 52.567 52.169 51.749 51.161 50.131 47.888 44.999 46.047 49.039

```

Fig.34 . Detalle del archivo MTN25_0964_H30.asc en Notepad++. Fuente: elaboración propia.

4.3 Selección de archivos de interpolación

En esta fase se hace una selección de las pruebas a realizar y se seleccionan los archivos que van a ser interpolados.

4.3.1 Selección de métodos de interpolación

A partir de estudiar trabajos previos sobre la interpolación de variables climáticas, se ha decidido estudiar los siguientes métodos de interpolación:

Presión: inverso de la distancia, co-kriging ordinario, spline thin plate y regresión múltiple.

Precipitación: inverso de la distancia, co-kriging y regresión múltiple.

Profundizando en cada uno de los métodos:

4.3.1.1 Inverso de la distancia (IDW)

El inverso de la distancia es un método de interpolación que estima los valores de la celda promediando los valores de los datos a partir de los valores de sus vecinos. Parte de la afirmación de que los puntos más cercanos tienen más valor que los más lejanos. (Samanta et al., 2012). La fórmula es:

$$\hat{z}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(s_i) \cdot w_{0i}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n w_{0i}^{-\alpha}}$$

Fig.35 . Fórmula de IDW. Fuente: (Meng et al, 2013)

La superficie depende de la selección de una potencia y de la estrategia de búsqueda de vecindad.

4.3.1.2 Co-kriging ordinario

El co-kriging forma parte de una serie de métodos llamados geostatísticos, que asumen que la variación espacial de una variable continua es irregular, por lo que no puede ser modelado por una función matemática, sino por una superficie de probabilidad. (Moral, 2010)

El co-kriging necesita de una variable primaria y auxiliar. El co-kriging ordinario parte de la fórmula del kriging ordinario:

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i)$$

Fig.36 . Fórmula de Ordinary Kriging. Fuente: (Meng et al, 2013)

En esta fórmula los pesos son determinados por el semivariograma.

Así, dentro del co-kriging cada dato interpolado debe cumplir que las diferencias entre parejas de datos existen y son fijas en los primeros y segundos momentos (Meng et al., 2013).

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{j=1}^n z(s_j) \lambda_{j\bullet}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{j\bullet} = 1$$

$$\sum_{\phi=1}^v \Gamma(s_i, s_j) + \Psi = \Gamma(s_i, s_0) \quad i = 1, \dots, n$$

Fig.37 . Fórmulas de Co-Kriging. Fuente: (Meng et al, 2013)

En el trabajo se ha usado el co-kriging ordinario de ArcGIS, usando como variable secundaria el Modelo Digital de Elevaciones de cada zona.

4.3.1.3 Spline thin plate

El spline es un método de interpolación que estima los valores usando una función matemática que minimiza la curvatura de la superficie, resultando una superficie suavizada que pasa exactamente por los puntos de interpolación. El spline thin plate, también llamado spline laplaciano, tiene la siguiente fórmula:

$$q_i = f(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^p \beta_j \psi_{ij} + \varepsilon_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

Fig.38 . Fórmula del spline thin plate. Fuente: (Dewi Hartkamp et al, 1999)

El parámetro de suavizado se calcula minimizando la función de correlación cruzada. (Moral, 2010).

4.3.1.4 Regresión múltiple

Forma parte de los métodos denominados globales, en las que se puede usar diferentes variables independientes para interpolar. En ella se intenta construir un modelo que represente la dependencia de una variable cuantitativa respecto de varias variables explicativas cuantitativas. Junto con los diferentes modelos de regresión es un método global, con transiciones abruptas, y cuyos resultados depende de la exactitud del modelo de regresión y la calidad de las superficies de los datos de interpolación (Dewi Hartkamp et al., 1999).

4.3.2 Cómputo del número de registros por fecha

Partiendo de los archivos obtenidos en la subfase anterior, se decide para hacer pruebas de interpolación que tanto para presión y precipitación la prueba sea del mismo día y hora. Para partir del máximo de registros posibles, se realiza una cuenta de los registros existentes en las tablas obtenidas a partir del búfer de 100 km de presión y precipitación a las 06:00 y las 14:00, las horas de interpolación previstas. De cada zona se obtiene un registro que será el archivo definitivo de interpolación.

Como primera conclusión, al observar los resultados, se observa que existen pocos valores de presión y precipitación en los archivos de 100 km, por lo que se descarta realizar el mismo cómputo en 60 km e interpolar sobre estas tablas.

A la hora de representar esta contabilidad en precipitación se cuentan el número de observaciones con registros diferentes a 0 (ya que existen todos los valores y no tiene sentido interpolar un archivo con todos los registros con valor 0) y en presión solamente el número de registros, ya que existen observaciones con registros nulos.



Zona: Sector costero: Llano

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
costa_llano100_apr_110926:	06:00:00	0	8	24
costa_llano100_apr_110926:	14:00:00	0	8	24
costa_llano100_apr_111216	06:00:00	0	7	12
costa_llano100_apr_111216	14:00:00	0	7	12
costa_llano100_apr_120326	06:00:00	0	7	13
costa_llano100_apr_120326	14:00:00	0	8	13
costa_llano100_apr_120626	06:00:00	0	7	13
costa_llano100_apr_120626	14:00:00	0	6	11
costa_llano100_bpr_111025	06:00:00	1	7	26
costa_llano100_bpr_111025	14:00:00	0	7	26
costa_llano100_bpr_120115	06:00:00	0	8	13
costa_llano100_bpr_120115	14:00:00	4	8	13
costa_llano100_bpr_120430	06:00:00	2	8	12
costa_llano100_bpr_120430	14:00:00	0	8	12
costa_llano100_bpr_120726	06:00:00	0	8	14
costa_llano100_bpr_120726	14:00:00	0	8	14
costa_llano100_ca_120810	06:00:00	0	8	14
costa_llano100_ca_120810	14:00:00	0	8	14
costa_llano100_fr_120212	06:00:00	0	8	13
costa_llano100_fr_120212	14:00:00	0	8	13

Zona: Sector costero montañoso: Barlovento

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
costa_blv100_apr_110926	06:00:00	0	4	23
costa_blv100_apr_110926	14:00:00	0	4	23
costa_blv100_apr_111216	06:00:00	2	5	12
costa_blv100_apr_111216	14:00:00	8	5	12
costa_blv100_apr_120326	06:00:00	0	4	10
costa_blv100_apr_120326	14:00:00	0	5	11
costa_blv100_apr_120626	06:00:00	0	5	12
costa_blv100_apr_120626	14:00:00	0	5	12
costa_blv100_bpr_111025	06:00:00	1	3	21
costa_blv100_bpr_111025	14:00:00	2	2	20
costa_blv100_bpr_120115	06:00:00	0	5	10
costa_blv100_bpr_120115	14:00:00	0	5	11
costa_blv100_bpr_120430	06:00:00	0	5	11
costa_blv100_bpr_120430	14:00:00	0	5	11
costa_blv100_bpr_120726	06:00:00	0	4	10
costa_blv100_bpr_120726	14:00:00	2	4	10
costa_blv100_ca_120810	06:00:00	0	5	11
costa_blv100_ca_120810	14:00:00	0	5	11
costa_blv100_fr_120212	06:00:00	0	5	11
costa_blv100_fr_120212	14:00:00	0	4	10

Zona: Sector costero montañoso: Sotavento



Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
costa_sotav100_apr_110926	06:00:00	0	7	21
costa_sotav 100_apr_110926	14:00:00	0	8	21
costa_sotav 100_apr_111216	06:00:00	0	8	10
costa_sotav 100_apr_111216	14:00:00	0	7	10
costa_sotav 100_apr_120326	06:00:00	0	6	9
costa_sotav 100_apr_120326	14:00:00	0	6	9
costa_sotav 100_apr_120626	06:00:00	0	7	10
costa_sotav 100_apr_120626	14:00:00	0	7	10
costa_sotav 100_bpr_111025	06:00:00	0	8	21
costa_sotav 100_bpr_111025	14:00:00	0	8	21
costa_sotav 100_bpr_120115	06:00:00	0	6	10
costa_sotav 100_bpr_120115	14:00:00	0	7	11
costa_sotav 100_bpr_120430	06:00:00	0	5	8
costa_sotav 100_bpr_120430	14:00:00	0	7	11
costa_sotav 100_bpr_120726	06:00:00	0	7	10
costa_sotav 100_bpr_120726	14:00:00	0	7	10
costa_sotav 100_ca_120810	06:00:00	0	5	8
costa_sotav 100_ca_120810	14:00:00	0	6	9
costa_sotav 100_fr_120212	06:00:00	0	5	9
costa_sotav 100_fr_120212	14:00:00	0	6	9

Zona: Sector interior llano: Regadío

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
interior_llano_regadio100_apr_110926	06:00:00	0	5	43
interior_llano_regadio100_apr_110926	14:00:00	0	4	42
interior_llano_regadio100_apr_111216	06:00:00	0	4	10
interior_llano_regadio100_apr_111216	14:00:00	1	4	10
interior_llano_regadio100_apr_120326	06:00:00	0	5	16
interior_llano_regadio100_apr_120326	14:00:00	0	5	12
interior_llano_regadio100_apr_120626	06:00:00	0	4	15
interior_llano_regadio100_apr_120626	14:00:00	0	4	15
interior_llano_regadio100_bpr_111025	06:00:00	0	4	43
interior_llano_regadio100_bpr_111025	14:00:00	0	3	42
interior_llano_regadio100_bpr_120115	06:00:00	0	5	14
interior_llano_regadio100_bpr_120115	14:00:00	0	5	14
interior_llano_regadio100_bpr_120430	06:00:00	6	5	14
interior_llano_regadio100_bpr_120430	14:00:00	1	5	13
interior_llano_regadio100_bpr_120726	06:00:00	0	4	17
interior_llano_regadio100_bpr_120726	14:00:00	0	4	13
interior_llano_regadio100_ca_120810	06:00:00	0	5	15
interior_llano_regadio100_ca_120810	14:00:00	0	5	14
interior_llano_regadio100_fr_120212	06:00:00	0	4	17
interior_llano_regadio100_fr_120212	14:00:00	0	5	16

Zona: Sector interior llano: Secano

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total
-------------	-------	------	------	-------



				registros
interior_llano_secano100_apr_110926	06:00:00	0	6	20
interior_llano_secano 100_apr_110926	14:00:00	0	6	20
interior_llano_secano 100_apr_111216	06:00:00	0	7	9
interior_llano_secano 100_apr_111216	14:00:00	0	7	9
interior_llano_secano 100_apr_120326	06:00:00	0	7	8
interior_llano_secano 100_apr_120326	14:00:00	0	6	9
interior_llano_secano 100_apr_120626	06:00:00	0	7	9
interior_llano_secano 100_apr_120626	14:00:00	0	7	8
interior_llano_secano 100_bpr_111025	06:00:00	0	7	19
interior_llano_secano 100_bpr_111025	14:00:00	0	7	20
interior_llano_secano 100_bpr_120115	06:00:00	0	7	8
interior_llano_secano 100_bpr_120115	14:00:00	2	7	9
interior_llano_secano 100_bpr_120430	06:00:00	0	8	9
interior_llano_secano 100_bpr_120430	14:00:00	1	7	7
interior_llano_secano 100_bpr_120726	06:00:00	0	6	8
interior_llano_secano 100_bpr_120726	14:00:00	0	7	11
interior_llano_secano 100_ca_120810	06:00:00	0	6	9
interior_llano_secano 100_ca_120810	14:00:00	0	6	9
interior_llano_secano 100_fr_120212	06:00:00	0	7	8
interior_llano_secano 100_fr_120212	14:00:00	0	7	9

Zona: Sector interior con estaciones a sotavento

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
interior_montu_sotav100_apr_110926	06:00:00	0	5	37
interior_montu_sotav100_apr_110926	14:00:00	0	5	37
interior_montu_sotav100_apr_111216	06:00:00	2	7	16
interior_montu_sotav100_apr_111216	14:00:00	8	7	16
interior_montu_sotav100_apr_120326	06:00:00	0	6	15
interior_montu_sotav100_apr_120326	14:00:00	0	7	15
interior_montu_sotav100_apr_120626	06:00:00	0	7	17
interior_montu_sotav100_apr_120626	14:00:00	0	7	17
interior_montu_sotav100_bpr_111025	06:00:00	1	5	35
interior_montu_sotav100_bpr_111025	14:00:00	2	4	33
interior_montu_sotav100_bpr_120115	06:00:00	0	6	14
interior_montu_sotav100_bpr_120115	14:00:00	0	7	16
interior_montu_sotav100_bpr_120430	06:00:00	0	7	16
interior_montu_sotav100_bpr_120430	14:00:00	1	7	17
interior_montu_sotav100_bpr_120726	06:00:00	0	7	16
interior_montu_sotav100_bpr_120726	14:00:00	0	7	16
interior_montu_sotav100_ca_120810	06:00:00	0	6	15
interior_montu_sotav100_ca_120810	14:00:00	0	7	16
interior_montu_sotav100_fr_120212	06:00:00	0	7	17
interior_montu_sotav100_fr_120212	14:00:00	0	6	16

Zona: Sector interior con estaciones a barlovento

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
interior_montu_barlo100_apr_110926	06:00:00	0	13	44
interior_montu_barlo100_apr_110926	14:00:00	0	13	44
interior_montu_barlo100_apr_111216	06:00:00	0	11	18
interior_montu_barlo100_apr_111216	14:00:00	0	12	19
interior_montu_barlo100_apr_120326	06:00:00	0	13	21

interior_montu_barlo100_apr_120326	14:00:00	0	13	20
interior_montu_barlo100_apr_120626	06:00:00	0	13	22
interior_montu_barlo100_apr_120626	14:00:00	0	13	21
interior_montu_barlo100_bpr_111025	06:00:00	1	13	46
interior_montu_barlo100_bpr_111025	14:00:00	0	12	45
interior_montu_barlo100_bpr_120115	06:00:00	0	12	18
interior_montu_barlo100_bpr_120115	14:00:00	6	13	20
interior_montu_barlo100_bpr_120430	06:00:00	3	14	20
interior_montu_barlo100_bpr_120430	14:00:00	2	14	21
interior_montu_barlo100_bpr_120726	06:00:00	0	14	23
interior_montu_barlo100_bpr_120726	14:00:00	0	13	22
interior_montu_barlo100_ca_120810	06:00:00	0	14	23
interior_montu_barlo100_ca_120810	14:00:00	0	13	22
interior_montu_barlo100_fr_120212	06:00:00	0	14	23
interior_montu_barlo100_fr_120212	14:00:00	0	13	22

Zona: Sector interior con estaciones con dos vertientes

Nombre capa	Fecha	Prec	Pres	Total registros
interior_montu_2vert100_apr_110926	06:00:00	0	11	44
interior_montu_2vert100_apr_110926	14:00:00	0	11	44
interior_montu_2vert100_apr_111216	06:00:00	0	11	16
interior_montu_2vert100_apr_111216	14:00:00	0	10	16
interior_montu_2vert100_apr_120326	06:00:00	0	12	16
interior_montu_2vert100_apr_120326	14:00:00	0	13	19
interior_montu_2vert100_apr_120626	06:00:00	0	14	21
interior_montu_2vert100_apr_120626	14:00:00	0	14	20
interior_montu_2vert100_bpr_111025	06:00:00	1	10	40
interior_montu_2vert100_bpr_111025	14:00:00	1	10	40
interior_montu_2vert100_bpr_120115	06:00:00	0	12	16
interior_montu_2vert100_bpr_120115	14:00:00	1	13	17
interior_montu_2vert100_bpr_120430	06:00:00	1	11	16
interior_montu_2vert100_bpr_120430	14:00:00	0	12	17
interior_montu_2vert100_bpr_120726	06:00:00	0	8	14
interior_montu_2vert100_bpr_120726	14:00:00	0	10	16
interior_montu_2vert100_ca_120810	06:00:00	0	13	19
interior_montu_2vert100_ca_120810	14:00:00	0	13	19
interior_montu_2vert100_fr_120212	06:00:00	0	7	11
interior_montu_2vert100_fr_120212	14:00:00	0	10	14

4.4 Características de la interpolación

En esta fase se especifican detalles de los métodos utilizados, el software usado y los archivos que se crean.

En todas las pruebas existe una parte de errores, en la que se reflejan los diferentes parámetros de error de la capa de interpolación, y una parte de comparación de valores interpolados con los reales. Se ha realizado una selección del 85-90% de las estaciones, para su posterior comparación con los valores que quedan fuera y determinar la magnitud de los errores existentes. Así, en primer lugar en QGIS

se seleccionan todas las observaciones de la hora de interpolación y se exportan en formato shape con el nombre compuesto por el prefijo selección seguido del nombre de la zona, por ejemplo selección_costa_llano.shp.

De este archivo se realiza la selección del 85-90% de las estaciones volviendo a exportar en formato shape con el nombre compuesto por el prefijo prueba seguido del nombre de la zona.

Con esto, a la hora de comparar valores se coloca espacialmente una capa encima de otra y se puede saber el punto exacto en el que se debe comparar el valor de la capa de interpolación con el real.

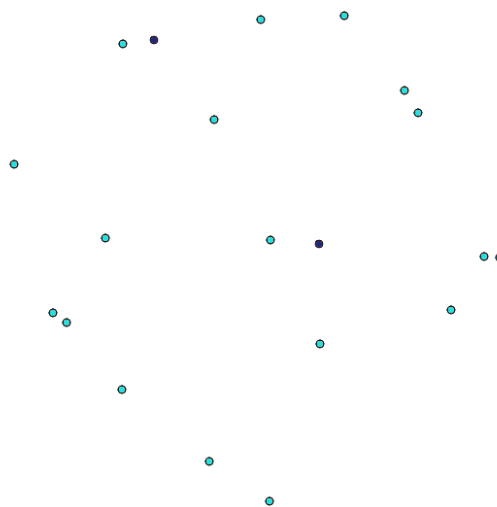


Fig. 39. Vista de la prueba para precipitación de la zona de interior montañoso barlovento. En azul está el archivo de prueba y en violeta el archivo primario de selección en QGIS. Fuente: elaboración propia.

Para el co-kriging y la regresión múltiple, los archivos en formato ASCII deben ser combinados en forma de mosaico y transformados de UTM Huso 30 a WGS84 UTM Huso 30, porque todas las capas vectoriales están en esa proyección. Para ello, se hace el proceso dentro de una geodatabase si se trabaja en ArcGIS o se crean archivos TIFF si se realiza en QGIS.

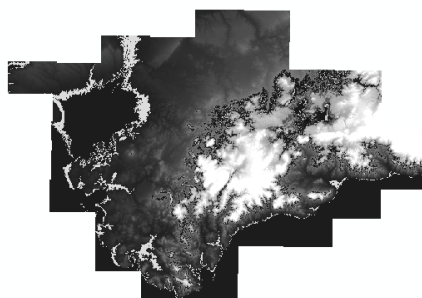


Fig.40 . Vista del mosaico para la zona interior montañoso barlovento en ArcGIS. Fuente: elaboración propia.

propia.

En el inverso de la distancia, se ha usado ArcGIS dentro de la extensión Geostatistical Wizard. No se han aplicado pesos. La potencia ha sido 2 (la más común en los artículos estudiados) y la búsqueda de vecindad a todas direcciones.

En el co-kriging, se ha usado el Ordinary Co-Kriging con los parámetros que aparecen por defecto en el software, que ha sido ArcGIS dentro de la extensión Geostatistical Wizard. Como archivo secundario se usa el mosaico creado para cada zona, y que está dentro de una geodatabase.

En el spline thin plate, este método solo se usa para presión y se utiliza el geoalgoritmo de SAGA de spline thin plate global (Spline thin plate (global)) con diferentes parámetros de suavizado: 0, 200, 400, 450 y 500.

En el caso de regresión múltiple, se usa el geoalgoritmo de SAGA de regresión múltiple de puntos y mallas (Multiple Regression Analysis Points/Grids) dentro de QGIS. Dentro del geoalgoritmo se elige el método de Inverse Distance Weighting, ya que es el usado en uno de los artículos de base. (Moral, 2010). Como malla se usa el mosaico creado para cada zona, que está en formato TIFF previa reproyección a WGS84 UTM 30 (EPSG: 32630).

En el apartado de errores, para IDW y Ordinary Co-Kriging, se recoge la media de la diferencia entre valor interpolado y real y el llamado RMSE (Root Mean Square Error). Es la raíz cuadrada del error cuadrático medio, calcula la diferencia entre el valor real de cada punto, y el valor de los puntos en la curva de mejor ajuste.

Para regresión múltiple y los diferentes splines, se recoge la desviación estándar, el valor máximo, mínimo y la media de la capa de interpolación.

Todos las interpolaciones creadas han sido exportadas, como archivo capa de ArcGIS (extensión *. lyr) en el caso de IDW y Ordinary Co-kriging y en formato GTiff en el caso de la regresión múltiple y los diferentes splines thin plate. Todos los GTiff tienen como paso de malla 25 m, al ser el paso de malla del Modelo Digital de Elevaciones usado en el proyecto. En el Anexo B aparecen los resultados de las diferentes interpolaciones realizadas.

Para realizar las interpolaciones, se supone del supuesto de que la fecha de interpolación debe ser la misma para presión y precipitación dentro de una misma zona.

Las interpolaciones realizadas son:

Para presión, se realiza una primera prueba tomando la fecha que tiene máximos registros de presión, una segunda con una nueva fecha buscando el número máximo de estaciones de presión y en las estaciones con más de diez registros a la hora de interpolación (sólo dos, Interior montuoso con estaciones a barlovento y con dos vertientes) se realiza una tercera prueba con una fecha diferente, buscando siempre el número máximo de valores.

Para precipitación, se realizan pruebas para las estaciones que tienen registros distintos a cero, porque no tiene sentido interpolar una capa con todos los valores cero. Así, se eliminan las zonas: Montuoso costero: Sotavento e Interior montuoso con estaciones a dos vertientes.

De las seis restantes, se hace una primera prueba con la capa con el máximo número de registros de precipitación y una segunda cambiando las estaciones de comprobación.

Se realiza también una tercera prueba escogiendo una nueva fecha en todas las capas menos en Interior Llano: Secano debido a que no existen registros suficientes para realizar una nueva prueba con una nueva capa. Así, se realizan cinco nuevas pruebas.

En el anexo B se encuentran los resultados de estas interpolaciones y en el anexo C los mapas de estas interpolaciones.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Las conclusiones que se han obtenido se dividen en conclusiones de gráficas y conclusiones de interpolaciones.

5.1 Conclusiones de las gráficas

En el apartado de corrección y clasificación de las gráficas, inicialmente existen 4 veces más gráficas de precipitación que de presión.

El 25% de las gráficas iniciales de presión de familia de rayos están fuera de rango, subiendo hasta más del 55% en las gráficas de rayos.

Más del 35% de las gráficas iniciales de precipitación de familia de rayos están fuera de rango, aumentando hasta más del 65 % en las gráficas de rayos.

Una vez hecha esta primera selección, la proporción entre gráficas de precipitación y presión disminuye a tres, por lo que se han eliminado muchas más gráficas de presión que de precipitación.



A partir de esta selección, la clasificación entre gráficas de mañana, tarde y noche determina que aproximadamente el 45% de las gráficas corregidas han sido clasificadas de mañana, el 35-40 % de tarde y el 15-20 % de noche.

Dentro de esta clasificación, en familia de rayos y en presión la mayoría de las gráficas son clasificadas como buenas (45%) y regulares (45%). Para rayos y para presión, más del 80% de las gráficas son clasificadas como buenas y para precipitación aproximadamente el 50%. El 20 % de las gráficas de presión y el 50% de precipitación son consideradas regulares o malas.

Como resumen, ha existido una selección mucho más grande en precipitación en presión, debido también a la mayor presencia de gráficas de precipitación. Sin tener en cuenta a las gráficas fuera de rango, en la que la precipitación destaca claramente, en presión existen pocas gráficas malas o regulares (20%) mientras que la mitad de las gráficas de precipitación no son válidas para el estudio al ser también malas o regulares.

Al final quedan 105 gráficas de presión y 179 de precipitación válidas para el estudio, por lo que la proporción entre ellas disminuye a 1,7 veces.

Dentro de las características de las gráficas, en las gráficas de presión de familia de rayos sólo existen ocho gráficas, que no aportan ninguna conclusión.

En las gráficas de presión de rayos de mañana no se aprecia una tendencia clara ascendente o descendente, en el entorno de caída del rayo la pendiente suele algo más positiva. También suelen existir constantes pero pequeñas subidas y bajadas de 0,1 o 0,2 hPa.

En las gráficas de presión de tarde la tendencia de la presión es de ascender en la mayoría de los casos, siendo esa subida muy pronunciada en algunos casos (de hasta 3 hPa en los momentos previos a la caída del rayo). El entorno de caída del rayo presenta una pendiente positiva en general. En estas gráficas también existen esas pequeñas subidas y bajadas de presión, pero la tendencia general es de ascenso de la presión.

En las gráficas de presión de noche no se ve una tendencia clara ascendente o descendente, al haber pocas gráficas.

Como resumen, en presión sólo en las gráficas de tarde se ve una tendencia de ascenso, en general la forma de la gráfica depende de la geografía de la estación y la época del año de caída del rayo, aunque existen subidas y bajadas pequeñas de presión en tiempos muy cortos (30-50 min).

En cuanto a la precipitación, En las gráficas de precipitación de familia de rayos se aprecian máximos de precipitación en el entorno de duración de la tormenta y justo después de ella (media hora antes y después). Fuera de ese tiempo o no existe precipitación o no es destacable.

En las gráficas de precipitación de rayos (tanto mañana, tarde y noche) se distinguen máximos de precipitación en el entorno de caída del rayo (1 hora antes y después). Resulta curioso el alto número de casos en que existe precipitación sólo después de la caída del rayo (una media de 5mm, existiendo máximos de hasta 12 mm). Se puede decir que se demuestra que en la mayoría de los casos después de la caída del rayo cae una lluvia fuerte pero corta en el tiempo, y luego deja de llover. Fuera de ese tiempo o no existe precipitación o no es destacable, salvo en unos pocos casos.

5.2 Conclusiones de las interpolaciones

En presión, de las ocho zonas seis tienen menos de 10 estaciones de interpolación, incluido una única estación de comprobación, por lo que es imposible extraer una conclusión clara y fiable de método de un método adecuado o no.

Las únicas zonas de las que se puede extraer alguna conclusión, aunque no muy clara debido a las pocas estaciones de interpolación y comprobación son las que tienen más de diez estaciones de comprobación, es decir, las zonas interior montuoso con estaciones a barlovento y a dos vertientes.

Se aprecia en general dentro de las diferentes regularizaciones con thin plate existe una diferencia notable entre la regularización 0 y 50, y que a partir de ahí todas dan valores similares.

Los métodos con más desviación estándar son regresión múltiple y spline thin plate con regularización 0. En cuanto al error medio cuadrático, IDW y co-kriging tienen errores similares.

En la zona interior montuoso con estaciones a barlovento, aunque es difícil obtener conclusiones, la regresión múltiple da mejores resultados, seguido del thin plate spline con regularización 0, aunque varía mucho de una prueba a otra.

En la zona interior montuoso con estaciones a dos vertientes, aunque es difícil obtener conclusiones porque los resultados cambian mucho de una prueba a otra, el thin plate spline con regularización 0 da mejores resultados, aunque en algunas pruebas el co-kriging ordinario, la regresión y hasta el inverso de la distancia dan buenos resultados.

En precipitación, existen más de diez estaciones en todas las interpolaciones, así que se pueden sacar conclusiones más fiables que en presión, aunque también en algunos casos el número de estaciones es bajo.

En la zona costero: Llano existen precisiones similares entre el inverso de la distancia y el co-kriging, pero el IDW sería más fácil de calcular y consume mucho menos tiempo.

En la zona costero: Barlovento es difícil sacar conclusiones al existir sólo una prueba con las estaciones suficientes. En esa prueba destaca el inverso de la distancia, pero deberían hacerse más pruebas.

En la zona interior Llano: Regadío existen precisiones similares para todos los métodos, aunque podría destacar ligeramente el inverso de la distancia.

En la zona interior Llano: Secano es imposible obtener una conclusión al tener menos de diez estaciones de interpolación.

En la zona interior montuoso: Sotavento destaca el IDW cuando hay un número reducido de estaciones, cuando éste aumenta no destaca tanto. El resto de métodos dan mejores resultados o no dependiendo de la prueba.

En la zona interior montuoso: Barlovento existen precisiones similares para todos los métodos, aunque podría destacar ligeramente el inverso de la distancia.

En resumen, cada zona tiene unas características propias que producen diferencias entre los métodos de interpolación utilizados, aunque el inverso de la distancia da resultados aceptables en todos los casos.

5.3 Trabajos futuros

En cuanto a los trabajos futuros en el ámbito de las gráficas, sería aclarador el establecimiento de tendencias a partir del estudio de la forma de la gráfica dentro del entorno del rayo. También se podrían realizar nuevas gráficas estudiando otras características de las estaciones de AEMet para aumentar el número de datos.

En cuanto a las interpolaciones, en presión es fundamental aumentar el número de registros aumentando el número de estaciones de cada fecha o escogiendo otras zonas o fechas más características para obtener conclusiones fiables.

En la zona de costa montuoso: sotavento, al estar el centro del búfer en Avilés (plena costa asturiana) convendría mover hacia el interior el centro de ese búfer para aumentar el número de estaciones, porque actualmente la parte norte del búfer no existe ninguna estación al abarcar parte del mar Cantábrico.

En precipitación para tener conclusiones más fiables se deberían buscar fechas con registros en las zonas que no han podido ser interpoladas y aumentar el número de ellos en las zonas restantes.

6. Presupuesto

En el presupuesto se han tomado para el cálculo de los precios unitarios (€/ día) una media de 252 días laborables en el año. Se ha decidido dividir las partidas en ordenador, investigador, ArcGIS y MATLAB, debido a que los demás programas usados son gratuitos.

Las tareas del trabajo se han dividido en:

1. Lectura de artículos y textos (1 mes). Uso de: investigador y ordenador
2. Análisis y tratamiento de los datos (1 mes). Uso de: investigador, ordenador y MATLAB
3. Estudio de datos y selección de técnicas de interpolación (2 meses). Uso de: investigador, ordenador, MATLAB (1 mes) y ArcGIS (1 mes)
4. Utilización de programas SIG para interpolaciones (2 meses). Uso de: investigador, ordenador y ArcGIS
5. Análisis y comparación de resultados (1/2 mes). Uso de: investigador y ordenador
6. Resultados (1/2 mes). Uso de: investigador y ordenador

Para el cálculo del precio unitario del investigador, se ha tomado el valor de 18 €/ día, similar a los topógrafos de obra. Teniendo en cuenta que el día tiene como media 8 horas laborables, el precio unitario es 144 €/día.

Para el cálculo del precio unitario del ordenador, se ha tenido en cuenta el modelo de ordenador y el precio de amortización. Se ha usado un HP Compaq 6720s, con un precio inicial de 600 €. Al tener una antigüedad de 6 años, el precio amortizado se queda en: $600/6 = 100$ €/ año. Al dividirlo por el número de días laborables, el precio unitario se queda en 0,4 €/día.

Para el cálculo del precio unitario de MATLAB, se obtiene una licencia de estudiante de la página web oficial de la empresa que cuesta 69 € sin IVA. Sumándole el IVA se obtienen 83,49 €. Al dividirlo por el número de días laborables, el precio unitario se queda en 0,33 €/día. Para el cálculo del precio unitario de ArcGIS, se obtiene una licencia con Spatial Analyst que cuesta 2500 \$, que son 1834 €. Al dividirlo por el número de días laborables, se obtiene un precio unitario de 7,28 €/día.



PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL (P.E.M)					
Unidad	Unidad de muestra	Descripción Unidad	Medición	Precio Unitario	Importe (€)
<u>Capítulo 1. Investigador</u>					
1.01	Día	Lectura de artículos y textos	20	144	2880
1.02	Día	Análisis y tratamiento de los datos	20	144	2880
1.03	Día	Estudio de datos y selección de técnicas de interpolación	40	144	5760
1.04	Día	Utilización de programas SIG para interpolaciones	40	144	5760
1.05	Día	Análisis y comparación de resultados	10	144	1440
1.06	Día	Resultados	10	144	1440
Total Capítulo 1 Investigador					20160
<u>Capítulo 2. Ordenador</u>					
2.01	Día	Lectura de artículos y textos	20	0,4	8
2.02	Día	Análisis y tratamiento de los datos	20	0,4	8
2.03	Día	Estudio de datos y selección de técnicas de interpolación	40	0,4	10
2.04	Día	Utilización de programas SIG para interpolaciones	40	0,4	10
2.05	Día	Análisis y comparación de resultados	10	0,4	4
2.06	Día	Resultados	10	0,4	4
Total Capítulo 2 Ordenador					44
<u>Capítulo 3. ArcGIS</u>					
3.03	Día	Estudio de datos y selección de técnicas de interpolación	20	7,28	145,6
3.04	Día	Utilización de programas SIG para	40	7,28	291,2



interpolaciones					
Total Capítulo 3 ArcGIS					436,8
Capítulo 4. MATLAB					
4.02	Día	Análisis y tratamiento de los datos	20	0,33	6,6
4.03	Día	Estudio de datos y selección de técnicas de interpolación	20	0,33	6,6
Total Capítulo 4 MATLAB					13,2
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL					20654

<u>Capítulo</u>	<u>Descripción capítulo</u>	<u>Importe (€)</u>	<u>%</u>
1	Topógrafo	20160	97,60
2	Ordenador	44	0,21
3	ArcGIS	436,8	2,11
4	MATLAB	13,2	0,06
PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL		20654	100
Gastos Generales (13%)		2685,02	
Beneficio Industrial (6%)		1239,24	
		Suma G.G y R.I	3924,26
PRESUPUESTO SIN IVA			24578,26
IVA (21%)			5161,43
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA		29739,69 €	

Asciende el presupuesto a la expresada cantidad de VEINTINUEVE MIL SETECIENTOS TREINTA NUEVE CON SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS.

Madrid, 11 de Julio de 2014

Jacinto José Fernández Carmona

7. Referencias

Aalto, J.; Pirinen, P.; Heikkinen, J.; Ventälaäinen, A. Spatial interpolation of monthly climate data for Finland: comparing the performance of kriging and generalized additive models. *Theoretical and Applied Climatology* 112, pp 99-111. (2013).

Borges, P.; Tadeu, L.; Malheiros, A.; Tanaka, Y.M; Do Santos, F.D.; Conde, F.; Franke, J.; Barfus, K.; Bernhofer, C. WGI- Climate in Central Brazil. Final Workshop Project Integrated Water Resources Management in Distrito Federal DF. Technische Universität Dresden. June 4-6. (2013).

Camera, C. Rainfall daily gridded datasets for the periods 1980-2012 and 2020-2050. EWACC- Young Scholars Forum. The Cyprus Institute. Nicosia, 6-9 December (2012).

Cernuda, S. Estudio de la actividad de rayos y su relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación en España. Trabajo Fin de Máster Universitario en Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid. (2014).

Dewi Hartkamp, A.; De Beurs, K.; Stein, A.; White, J.W. Interpolation techniques for climate variables. *Natural Resources Group Geographic information Systems Series* 99-01. CIMMYT (1999).

Meng, Q.; Liu, Z.; Borders, B.E. Assessment of regression kriging for spatial interpolation- comparisons of seven GIS interpolation methods. *Cartography and Geographic Information Science*. Vol. 40; No. 1, pp. 28-39. (2013)

Moral, F.J; Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: application to precipitation. *International Journal of Climatology* 30, pp. 620-631. (2010).

Palomares Calderón, M. Los primeros pasos del Servicio Meteorológico español hace 120 años. *Calendario Meteorológico* 2009. AEMet. (2009).

Periódico Gaceta de Madrid. (18 de agosto de 1887). Consultado el 24 de abril de 2010.

Rodríguez-Pérez, J.R.; Faba-Fernández, M.; Blanco-Vázquez, M.A., Blanco-Oviedo, F.; Castedo-Dorado, M. Caracterización de los rayos que ocasionan incendios forestales mediante técnicas de teledetección de superficie y SIG. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz, Madrid, 22-24 octubre (2013).

Samanta, S; Kumar Pal, D.; Lohar, D.; Pal, B. Interpolation of climate variables and temperature modeling. *Theoretical and Applied Climatology* 107, pp 35-45. (2012).



Sarangi, A.; Cox, C.A.; Madramotoo, C.A. Geostatistical methods for prediction of spatial variability of rainfall in a mountainous region. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 48, pp. 943-954 (2004).

Sun, Q.; Miao, C.; Duan, Q; Kong, D.; Ye, A.; Di, Z.; Gong, W. Would the real observed dataset stand up? A critical examination of eight observed gridded climate datasets for China. Environmental Research Letters 9 (2014).

Tafunell, X.; Carreras, A. Estadísticas históricas de España: siglos XIX-XX. Vol.1, pg 43. Ed: Fundación BBVA.

Yavuz, H.; Erdogan, S. Spatial Analysis of Monthly and Annual Precipitation Trends in Turkey. Water Resour Manage 26. Pp 609-621 (2012).